



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

VEDEN ILMASTUSLAITTEEN FYSIKAALINEN TARKASTELU

TEKIJÄ: Sami Vainio

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Sami Vainio			
Työn nimi Veden ilmastuslaitteen fysikaalinen tarkastelu			
Päiväys	25.5.2015	Sivumäärä/Liitteet	40/1
Ohjaaja Jarkko Surakka FM lehtori			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Sansox Oy			
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä tarkasteltiin Sansox Oy:n kehittämän veden ilmastuslaitteisto OxTuben fysikaalisia toimintaperiaatteita. Sansox Oy on cleantech teknologiaan keskittynyt yritys, joka haluaa tuottaa tutkimuksia innovoimistaan tuotteista. Opinnäytetyö on jatkoa kesän 2014 tutkimukselle, jossa selvitettiin laitteiston soveltuvuutta eri sovelluskohteisiin.</p> <p>Tarkastellut fysikaaliset toimintaperiaatteet pohjautuivat pääasiassa pyörimis- ja impulssi-ilmiöihin, jotka tuotiin esille yleisesti tunnettujen fysiikan lakien avulla laskemalla niistä esimerkkilaskut pohjautuen laitteiston oikeisiin mittoihin. Lisäksi työssä esiteltiin OxTube-ilmastuslaitteella toteutetun tutkimuksen tuloksia. Työssä tuotiin myös esille keskeisimmät hydrodynamiikan osa-alueet sekä putkistovirtaukseen vaikuttavat kitka- ja paikallishäviöt havainnollistamalla niitä esimerkkilaskujen avulla.</p> <p>Opinnäytetyön tulokset esittävät ilmastuksen taustalla olevat fysikaaliset lait ja lasketut tulokset havainnollistavat näiden suuruutta teoreettisilla arvoilla. Esitetyt fysikaaliset lait ja tulokset ovat tarkoitettu OxTube-laitteiston kehitystyön tueksi ja niitä voidaan hyödyntää myös jo asennettuihin kohteisiin.</p>			
Avainsanat veden ilmastus, impulssi, pyörimisliike			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author Sami Vainio			
Title of Thesis Physical Examination of Water Aerator			
Date	25 may 2015	Pages/Appendices	40/1
Supervisor Mr. Jarkko Surakka, Lecturer			
Client Organisation /Partners Sansox Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of the thesis was to study theoretically the operational principles of the water aeration device OxTube. OxTube is designed by Sansox Oy which is a company specialized in cleantech technology. The thesis was inspired by a study which was done with the OxTube water aerator device in summer 2014.</p> <p>The function of the water aeration device OxTube is mainly based on vortex and impulse phenomena. These phenomena are demonstrated in the thesis by calculations according to the laws of physics. A study done with the OxTube water aerator is also introduced in the thesis. In addition, the most important hydrodynamics areas as well as the friction losses and local losses affecting the flow inside the pipe system are presented.</p> <p>The physical results and observations of the operational principles of the water aeration device OxTube can be useful especially in the development of the device.</p>			
Keywords water aeration, impulse, rotating motion			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
1.1	Tausta ja tavoitteet	5
1.2	Lyhenteet ja määritelmät	6
2	FYSIIKAN LAKEJA	7
2.1	Liike	7
2.2	Hydrodynamiikka	13
2.3	Nesteiden kitka- ja paikallishäviöt putkistossa	15
3	VEDEN ILMASTUSLAITTEISTOT	18
3.1	Veden ilmastuksen tavoitteet ja yleisimmät ilmastimet	18
3.2	Oxtube- veden ilmastuslaitteisto	20
4	TUTKIMUKSET VEDEN ILMASTUSLAITTEEN KÄYTÖSTÄ	21
4.1	Tutkimusten tausta	21
4.2	Hapensiirron teoria	21
4.3	Savonia-ammattikorkeakoulussa toteutetun tutkimuksen kohteet ja niiden tulokset	25
5	FYSIKAALISET TULOKSET OXTUBEN TOIMINTAPERIAATTEISTA	33
5.1	Tulosten laskenta	33
5.2	Pyörimisliike	33
5.3	Impulssi	34
5.4	Hydrodynamiikka	35
5.5	Kitka- ja paikallishäviöt	36
6	TOIMINTAPERIAATTEIDEN POHDINTA JA YHTEENVETO	38
	LÄHTEET	39
	LIITE 1 OXTUBE VEDEN ILMASTUSLAITE	

1 JOHDANTO

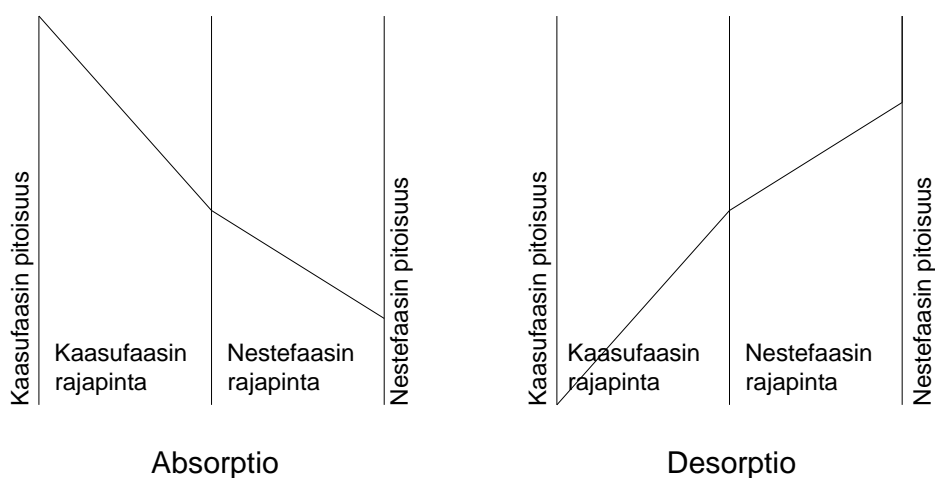
1.1 Tausta ja tavoitteet

Työssä käsiteltävä veden ilmastuslaite on innovoitu Sansox Oy:n (ent. Happihyrrä Oy) toimesta ja se on nimetty OxTubeksi. OxTube- veden ilmastuslaite on voittanut mm. WssTP Water Innovation SMEs Award -palkinnon, joka on tunnustus laitteiston innovatiivisuudesta sekä mahdollisuuksista kilpailla niin teollisuuden kuin pk-yritysten keskuudessa. Laitteisto soveltuu monenlaisiin prosesseihin esimerkiksi kalankasvatusaltaiden ilmastukseen. Yrityksen henkilökuntaan ja laitteiston käyttökohteisiin voi tutustua Sansox Oy:n nettisivuilta: www.sansox.fi.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan teoreettisesti Sansox Oy:n kehittämän veden ilmastuslaitteen fysikaalisia toimintaperiaatteita. Toimintaperiaatteet esitetään laskuesimerkein yleisesti tunnettujen fysiikan lakien avulla. OxTube-ilmastuslaitteen pääasiallisina toimintaperiaatteina ovat pyörimis- ja impulssi-ilmiöt.

Työssä esitellään myös OxTube-ilmastuslaitteella toteutetun tutkimuksen tuloksia havainnollistamaan, millaisiin sovelluksiin laitteistoa voidaan käytännössä hyödyntää. Lisäksi työssä käsitellään hydrodynamiikan yleisimpiä muuttujia ja tuodaan esille, miten kitka- ja paikallishäviöt vaikuttavat painehäviöön. Tietolähteinä käytetään fysiikan ja virtausmekaniikan yleisteoksia ja laskentaan Excel- ja Epanet-ohjelmistoja.

Ilmastuslaitteiden tehtävänä voi olla joko lisätä (Absorptio) tai poistaa (Desorptio) jotain kaasua nesteestä – yleisimmin halutaan lisätä liuenneen hapen pitoisuutta. Ilmastuksessa, eli diffuusiassa, kaasun- ja nestefaasi tuodaan kosketuksiin keskenään, jolloin pitoisuuserot tasaantuvat. Kuviossa 1 on havainnollistettu pitoisuuserojen tasaantuminen.



KUVIO 1. Kaasu- ja nestefaasin rajapintojen muodostuminen sekä kaasun siirtyminen rajapinnasta toiseen. Absorptiossa kaasufaasin pitoisuus alenee ja nestefaasin kasvaa. Desorptiossa tapahtuma on käänteinen.
(Muokattu lähteestä Sincero, 2000.)

Diffuusio on luonnollinen tapahtumaketju, jossa molekyylit liikkuvat satunnaisesti lämpöliikkeen vaikutuksesta ja tietyn ajan kuluessa pitoisuuserot tasaantuvat. Diffuusiota voidaan nopeuttaa tehokkaalla sekoittamisella ja kasvattamalla pitoisuuseroja.

1.2 Lyhenteet ja määritelmät

D	diffuusiovakio
C	kaasun pitoisuus mittaushetkellä
C_s	kaasun osittaispainetta vastaava kyllästysarvo
d	molekyläärisen siirtymäkerroksen paksuus
K	ilmastuskerroin
R	ominaishapenkulutus
$-K_L a$	kokonaishapensiirtokerroin
OTR	maksimaalinen hapensiirtonopeus (oxygen transfer rate)
AE	maksimaalinen ilmastustehokkuus (aeration efficiency)
OTR_c	hapensiirtonopeus happipitoiseen veteen ($\frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}$)
AE_c	ilmastustehokkuus happipitoiseen veteen ($\frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}}$),
α	jäteveden ja hanaveden suhteellinen hapensiirtokertoimen korjauskerroin
β	jäteveden ja hanaveden suhteellinen kyllästyspitoisuuksien korjauskerroin
$\bar{\zeta}$	nesteen keskimääräinen pyöriminen
Γ	nesteen pyöriminen kehällä
J	hitausmomentti $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
η	dynaaminen viskositeetti $\text{Pa} \cdot \text{s}$
Re	Reynoldsin luku (dimensioton)
h_f	painehäviö mvp
μ	kinemaattinen viskositeetti $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
f	kitkakerroin (dimensioton)
ε	putken karkeus mm
C	kitkakerroin (dimensioton)
h_L	paikallishäviö mvp
K_p	paikallishäviökerroin (dimensioton)

2 FYSIIKAN LAKEJA

2.1 Liike

Fysiikan peruseriaate on laatia tieteellisiä matemaattisia lakeja kokeellisten tutkimusten perusteella. Seuraavissa kappaleissa ja luvuissa esitetään yleisesti tunnettuja fysiikan lakeja, jotka vaikuttavat mm. veden ilmastukseen.

Liike voidaan kuvata muutostilana, jossa jonkin kappaleen sijainti muuttuu ajan muuttuessa. Liike voi olla lineaarista tai epälineaarista. Isaac Newton julkaisi vuonna 1687 teoksessaan *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* kolme liikkeen peruslakia (Newton 1686, 8):

1. "Kappale jatkaa liikettään suoraviivaisesti muuttumattomalla nopeudella tai pysyy levossa, jos se ei ole vuorovaikutuksessa muiden kappaleiden kanssa.
2. Kappaleeseen vaikuttava kokonaisvoima $\sum \vec{F}$ antaa kappaleelle kiihtyvyyden \vec{a} . Kappaleeseen vaikuttavan kokonaisvoiman ja kappaleen saaman kiihtyvyyden välillä on yhteys $\sum \vec{F} = m\vec{a}$.
3. Kahden kappaleen vuorovaikutuksesta syntyvät voima ja vastavoima ovat yhtä suuria, mutta vastakkaissuuntaisia, ja ne vaikuttavat eri kappaleisiin" (Mäkynen 2014, 54.)

Opinnäytetyössä tarkastellaan edellämainittuja lakeja, jotta saadaan selville minkätyyppinen virtausvastus luo parhaan liikkeen veden ilmastuksen tehokkuuden kannalta. Tarkasteltaessa esimerkiksi veden liikettä tulee ottaa huomioon, että siihen vaikuttaa useita erisuuntaisia voimia. Laskennan kannalta on kuitenkin järkevää tarkastella jokaista voimaa erikseen, minkä jälkeen ne voidaan summata saaden todellista vastaava teoreettinen voima. Voiman (F) suuruuteen vaikuttavat kohteen massa (m) sekä kiihtyvyys (a). Isaac Newtonin toisen lain mukaisesti massan ja kiihtyvyyden tulon kaavaksi saadaan siis,

$$\sum F = ma. \quad (2.1.1)$$

$$[F] = \frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} = \text{N}$$

Liikemäärä ja impulssi

Ajatellaan edellisessä kappaleessa käytettyä veden liikettä. Vesisäiliö tyhjenetään sen alla olevaan vesisäiliöön, minkä seurauksena aiheutuu liikettä, jolla on jokin suunta, kiihtyvyys, massa sekä aika, joka menee yläpuolisen säiliön tyhjenemiseen.

Näiden liikettä aiheuttavien tekijöiden tulo on yhtäkuin liikemäärä:

$$\vec{p} = m\vec{a}\Delta t, \quad (2.1.2)$$

joka sievenee massan ja nopeuden tuloksi

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (2.1.3)$$

$$[\vec{p}] = \frac{\text{kgm}}{\text{s}} = \text{Ns}$$

Liikemäärän kuvauksessa käytettiin esimerkkinä veden liikettä säiliöstä toiseen. Ajatellaan edelleen siten, että säiliön tyhjeneminen aiheuttaa liikettä, kuten liikemäärän määrittämisessä esitettiin, mutta nyt vesimassa voidaan ajatella osuvan allaolevan säiliöön vesimassan ja kiihtyvyyden tulon voimana. Vesimassan törmättyä säiliönpohjaan kuluu jonkin aikaa, että kaikki voima on muuttanut suuntaa. Eli liikemäärä on muuttunut ja ilmiö, jota kutsutaan impulssiksi, on tapahtunut. Impulssin kaavaksi saadaan,

$$\vec{I} = \vec{F}\Delta t, \quad (2.1.4)$$

$$[\vec{I}] = \frac{\text{kgm}}{\text{s}} = \text{Ns}$$

jossa \vec{F} on suuntautunut voima ja Δt on voiman vaikutusaika.

Kuten liikemäärän ja impulssin yksiköistä nähdään, ne ovat yhtenevät. Niiden ero onkin tulokinnassa ja siinä mihin niitä käytetään. Liikemääriä on mielekästä laskea silloin kun on kyse tietyistä massasta ja nopeudesta, ja impulsseja liikemäärän muuttuessa ($\vec{I} = \Delta\vec{p}$).

Paikka- ja nopeusvektori

Vektori on matemaattinen olio, jolla on jokin suunta ja suuruus. Yksinkertaisin tapa esittää paikka-vektori on sijoittaa sen alkupää origoon. Vektorilla voi olla kolme ulottuvuutta

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}, \quad (2.1.5)$$

joissa $x\hat{i}$, $y\hat{j}$ ja $z\hat{k}$ ovat vektorin komponentteja ja x , y ja z skalaari komponentteja. X , y ja z komponentit ovat vektorin sijaintitietoja, jotka ovat yhdensuuntaisia niiden akselien kanssa. Kun partikkeli liikkuu, sen sijainti origon suhteen muuttuu akselin myötäisesti partikkelin suuruuden verran.

Jos paikkavektori muuttuu, se on liikkunut origosta tiettyyn suuntaan tietyllä suuruudella, tästä saadaan

$$\Delta \vec{r} = (x_2 \hat{i} + y_2 \hat{j} + z_2 \hat{k}) - (x_1 \hat{i} + y_1 \hat{j} + z_1 \hat{k}), \quad (2.1.6)$$

jossa $x_2 \hat{i}, y_2 \hat{j}$ ja $z_2 \hat{k}$ ovat paikkavektorin sijaintitietoja liikkeen lopussa ja $x_1 \hat{i}, y_1 \hat{j}$ ja $z_1 \hat{k}$ ovat sen sijaintitietoja alussa. Nopeudellakin on aina jokin suunta ja suuruus, eli se on vektorisuure. Keskimääräinen-nopeus voidaan kirjoittaa

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}, \quad (2.1.7)$$

jossa $\Delta \vec{r}$ on kuljettu matka, siis saavutetun sijainnin ja lähtösijainnin erotus ja Δt on siihen kulunut aika. Silloin kun Δt lähestyy nollaa, voidaan kirjoittaa yhtälö nopeudelle

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \quad (2.1.8)$$

jossa oletetaan kulunut aika niin pieneksi, että nopeus on vakio. Äärimmäisen pienellä ajanhetkellä nopeus voidaan esittää nopeusvektorina

$$\vec{v} = (v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}), \quad (2.1.9)$$

jossa v_x on $\frac{dx}{dt}$, v_y on $\frac{dy}{dt}$ ja v_z on $\frac{dz}{dt}$.

Pyörimisliike ja -energia

Kun yksittäinen kappale tai vesimolekyyli pyörii tasaisesti ympyräradalla, voidaan sen kulma-asema φ määrittää ympyränkehän pituuden s ja säteen r avulla:

$$\varphi = \frac{s}{r}. \quad (2.1.10)$$

Kulma-asemalla ei ole yksikköä, mutta sille voidaan käyttää nimeä *radiaani* (rad). Täyden ympyrän kulma-aseman pituus on 2π , joka vastaa 360° :tta. Kulma-aseman muutosta vaikutusaikana t kuvaa

$$\omega_k = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}, \quad (2.1.11)$$

$$[\omega_k] = \frac{1}{s} = \frac{rad}{s}$$

joka on keskikulmanopeus.

Kulmanopeuden muutosta kuvaa kulmakihtiivvyys:

$$\alpha_k = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (2.1.12)$$

$$[\alpha_k] = \frac{rad}{s^2}$$

jossa kulmanopeus muuttuu aikana Δt arvosta ω_1 arvoon ω_2 . Energia, joka muodostuu kappaleen pyöriessä tietyllä nopeudella, voidaan määrittää pyörimisenergian kaavalla:

$$E_r = \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (2.1.13)$$

$$[E_r] = \frac{kgm^2}{s^2} = Nm$$

jossa J on hitausmomentti ja ω on pyörimisnopeus. Hitausmomentti taas saadaan massan m ja säteen r tulosta:

$$J = mr^2. \quad (2.1.14)$$

$$[J] = kg * m^2$$

Hitausmomentti riippuu siis kappaleen massasta ja säteestä, mutta myös muodosta, joka oletetaan tässä olevan pistemäinen. Kiinteiden erinmuotoisten kappaleiden hitausmomentin laskukaavoja on esitetty taulukossa 1. Hitausmomentti siis kuvaa kuinka suuri momentti tarvitaan, jotta kappale saa kulmakihtiivvydeksi yhden radiaanin sekunnissa.

TAULUKKO 1. Kirjallisuudesta löytyviä laskukaavoja erilaisille kappaleille (Mäkelä 2010)

Kappale	Massahitausmomentti J
Ohut ympyrälevy	$\frac{1}{2}mr^2$
Umpinainen pallo	$\frac{2}{5}mr^2$

Pyörimisliikkeen dynamiikka ja paineen jakautuminen

Erityyppisten pyörivien virtausten hahmottaminen muiden klassisten hydrodynaamisten muuttujien, kuten massan, liikemäärän ja energian lisäksi, tulisi olla tunnetumpaa. Pyörteisessä, eli turbulentsissa, virtauksessa sillä on suuri merkitys ja se on ensisijainen lähtömuuttuja pyörimisliikkeen dynamiikan tutkimuksissa. (Lappa 2012, 5.)

Pyörimisliike voidaan kuvata pyörimisen määränä, jossa pienet partikkelit pyörivät oman massan keskipisteen ympäri.

Keskimääräisestä nesteen pyörimisestä $\bar{\zeta}$ pinta-alalla A saadaan siis

$$\bar{\zeta} = \frac{\Gamma}{A}, \quad (2.1.14)$$

jossa Γ kuvaa nesteen pyörimistä kehällä. Alla nesteen pyöriminen Γ on määritelty nopeuden \underline{V} linjaintegraaliksi pituuden l ympärillä.

$$\Gamma = \oint_l \underline{V} * \hat{\underline{t}} dl, \quad (2.1.15)$$

jossa $\hat{\underline{t}}$ on pituusvektorin tangenti. Pyöriminen voidaan kuvata myös hetkellisesti,

$$\zeta = \frac{d\Gamma}{dA} \quad (2.1.16)$$

jossa kaava 2.1.16 lähestyy raja-arvoa nolla tietyllä pinta-alalla.

Tästä saadaan edelleen nesteen pyöriminen kehällä hyödyntämällä Navier-Stokesin yhtälöä liikemäärästä

$$\Gamma = \oint_l \underline{V} * \hat{\underline{t}} dl = \int_A (\underline{\nabla} \wedge \underline{V}) * \hat{\underline{n}} ds, \quad (2.1.17)$$

mikä vastaa pyörimistä Γ nopeudella \underline{V} millä tahansa pinta-alalla, joka on rajoitettu pituudella l . Yhtälössä $\hat{\underline{n}}$ on yksikkövektori kohtisuoraan pinta-alaa A kohti, mikä on rajoitettu pituudella l . Matemaattisesta näkökulmasta pyöriminen voidaan määrittää nopeuden pyörimiseksi, olettaen että pituus on lipschitzisesti jatkuva, eli

$$\underline{\zeta} = \underline{\nabla} \wedge \underline{V}. \quad (2.1.18)$$

Tämän vuoksi pyörimisliike on vektorisuure, jonka pyörimissuunta on x-akselin myötäisesti. (Lappa 2012, 5–6). X-akselin myötäisesti pyörivän nesteen ulkopuoliselle pyörimättömälle tilalle on annettu

$$q_\theta = \frac{\Gamma}{2\pi r}, \quad (2.1.19)$$

jossa $q_\theta = (u^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}$, jossa u ja w ovat x- ja y komponentteja nopeudelle, Γ on pyörteen voimakkuus ja r on säde.

Yhdistämällä q_θ bernoullin yhtälöön

$$p + \left(\frac{\rho}{2}\right) q^2 + \rho gh = p + \rho gh + \left(\frac{\rho}{2}\right) \left(\frac{\Gamma^2}{4\pi^2 r^2}\right) = \Pi, \quad (2.1.20)$$

jossa Π on bernoullin vakio, ja määrittämällä säde r päättymättömäksi luvuksi ∞ , saadaan yhtälö

$$(p + \rho gh) - (p + \rho gh)_0 = -\frac{\left(\frac{\rho}{8\pi^2}\right)\Gamma^2}{r^2}, \quad (2.1.21)$$

jossa paine vaihtelee käänteisesti säteen neliöön. Pyörivässä liikkeessä bernoullin vakio kuitenkin vaihtelee säteen vaihdellessa, joten yksinkertaisempi Eulerin yhtälö on otettava käyttöön. Eulerin yhtälöstä kiihtyvyyden komponentti normaalille tilavuusvirralle on annettu

$$a_n = \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{q^2}{n} = \frac{-\left(\frac{1}{\rho}\right)\partial}{\partial n(p + \rho gh)}, \quad (2.1.22)$$

jossa $n = r$ ja josta saadaan

$$\frac{\partial(p + \rho gh)}{\partial r} = -\frac{\rho q_\theta^2}{r}. \quad (2.1.23)$$

Nyt

$$q_\theta = \frac{\left(\frac{\Gamma}{2\pi a}\right)r}{a} \quad (2.1.24)$$

ja täten

$$\frac{\partial(p + \rho gh)}{\partial r} = \frac{\rho q_\theta^2}{r} = \frac{\rho r \Gamma^2}{4\pi^2 a^4}, \quad (2.1.25)$$

jossa a on säde. Integroimalla yhtälö

$$p + \rho gh = \left(\frac{\rho}{2}\right) \left(\frac{\Gamma^2}{4\pi^2 a^2}\right) \left(\frac{r}{a}\right)^2 + C \quad (2.1.26)$$

saadaan paineelle yhteys. Paine siis nousee säteen neliöön ja vakio C on arvioitu siten, että $r = a$, josta saadaan

$$C = (p + \rho gh)_0 - \frac{\rho \Gamma^2}{4\pi^2 a^2} \quad (2.1.27)$$

ja näin ollen

$$(p + \rho gh) - (p + \rho gh)_0 = \left(\frac{\rho}{2}\right) \left(\frac{\Gamma^2}{4\pi^2 a^2}\right) \left[\left(\frac{r}{a}\right)^2 - 2\right]. \quad (2.1.28)$$

Paineen vaihtelu pyörteen keskellä voidaan siis määrittää kaavalla 2.1.28. Paine pyörteen keskellä voi madaltua jopa niin paljon, että vesi höyrystyy huoneen lämpötilassa. (McCormack 2012, 14–16.)

2.2 Hydrodynamikka

Jatkuvuusyhtälö

Neste- ja kaasuvirtauksien tarkka matemaattinen analysointi on haastavaa, joten on laadittu jatkuvuusyhtälö lyhyiden putkistovirtauksien muutosten laskemiseksi. Jatkuvuusyhtälössä oletetaan, että virtaus on laminaarista ja muuttumatonta. Energian ei siis oleteta muuttuvan lämmöksi eikä kitkaa huomioida.

Näiden oletuksien perusteella voidaan johtaa, että putken pinta-alan läpi virtaavan nesteen tai kaasun tilavuus aikayksikössä on tilavuusvirta:

$$q_v = \frac{V}{t}, \quad (2.2.1)$$

$$[q_v] = \frac{m^3}{s}$$

joka sievenee muotoon

$$q_v = vA. \quad (2.2.2)$$

Jatkuvuusyhtälöllä

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.2.3)$$

tarkoitetaan siis sitä, että virtausnopeuden muututtua myös putken pinta-alan on muututtava tilavuusvirran pysyessä muuttumattomana. Sama pätee myös toisinpäin. (Hautala 2001; Mäkelä 2003.)

Poiseuillen laki

Tilavuusvirta voidaan laskea jatkuvuusyhtälöä tarkemmin käyttäen Jean Louis Poiseuillen (1799–1869) ja Gotthilf Heinrich Ludwig Hagenin (1797–1884) kehittämää kaavaa eli Hagen-Poiseuillen yhtälöä, jota kutsutaan myös Poiseuillen laiksi. Yhtälössä

$$q_v = \frac{\pi D^4}{128\eta} * \frac{p_1 - p_2}{l} \quad (2.2.4)$$

tilavuusvirta on riippuvainen paine-eron (Δp) ja putkenpituuden (l) suhteista ja on verrannollinen halkaisijan (D) neljänteen potenssiin. Yhtälö huomioi myös nesteen dynaamisen viskositeetin (η), joka on esimerkiksi vedellä $1 * 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Munson 2013).

Hagen-Poiseuillen yhtälössä oletetaan, aivan kuten jatkuvuusyhtälössä, että virtaus on laminaarista. Reynoldsin luvun tulee olla molempia yhtälöitä käytettäessä < 2100 .

Bernoullin laki

Daniel Bernoulli (1700–1782) julkaisi vuonna 1738 teoksen *Hydrodynamics*, jossa esiteltiin yhtälö

$$p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{vakio}, \quad (2.2.5)$$

kaasujen ja nesteiden staattisen (p), hydrostaattisen (ρgh) tai dynaamisen ($\frac{1}{2}\rho v^2$) paineen selvittämiseksi. Yhtälössä siis tarkastellaan työtä, joka kuluu fluidien tilavuuden siirtämiseen putkistossa. Toisin sanoen fluidien liikuttamiseen kuluva työ on potentiaalienergian (E_p) ja liike-energian (E_k) muutosta, josta saadaan

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta E_p + \Delta E_k \\ (p_1 - p_2)V &= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_2 - mgh_1. \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

Järjestetään yhtälön termit uudelleen ja jaetaan tilavuudella, saadaan

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2, \quad (2.2.7)$$

joka on yhtäkuin Bernoullin yhtälö. Eli yhtälö kertoo miten paine (p), tiheys (ρ), korkeus (h) ja nopeus (v) ovat yhteydessä toisiinsa (Hautala 2001; Munson 2013; Mäkelä 2003; Walker 2014; Young 1991.)

Yhtälöä käytettäessä on kuitenkin huomioitava, että neste tai kaasu on laskentavälillä kokoonpuristumatonta ja niiden virtaus on kitkatonta sekä muuttumatonta, eli laminaarista. Yhtälöä voidaan käyttää sekä planaarisessa että kolmiulotteisessa laskennassa. (Munson 2013.)

Reynoldsin luku

Fluidien stabiilisuuksien ja kaaottisuuksien laskeminen on hyvin haastavaa, minkä vuoksi on tukeuduttu dimensioanalyysiin. Dimensioanalyysissä haetaan kokeellisesti dimensiottomia muuttujia, jotka kuvaavat mahdollisimman tarkasti muutoksia ilman, että ilmiön luonne muuttuu. Fluidien virtauksien dimensiottoman luvun keksi Osborne Reynolds (1842–1912).

Reynoldsin luku

$$Re = \frac{vD}{\mu} \quad (2.2.8)$$

kuvaa inertia-voiman ja viskoosivoiman suhdetta. Luvussa v on keskimääräinen nopeus, D on putken halkaisija ja μ on kinemaattinen viskositeetti. (Hautala 2001; Munson 2013; Mäkelä 2003; Walker 2014; Young 1991.)

Reynoldsin luku on yksi käytetyimmistä fluidien laminaarisuuden tai turbulenttisuuden määrittämisessä. Osborne Reynolds havaitsi kokeellisesti, että virtaus on laminaarista, jos Re on < 2100 , ja turbulenttista, jos Re on > 3000 . Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välillä on ns. siirtymäalue, jossa virtaus voi olla osittain molempia. (Munson 2013.)

2.3 Nesteiden kitka- ja paikallishäviöt putkistossa

Nesteiden kitka- ja paikallishäviöt ovat tärkeimpiä tekijöitä putkistosuunnittelussa. Kitkahäviöiden suuruuteen vaikuttavat viskositeetti, virtausnopeus, putken karheus (ε), halkaisija ja pituus. Paikallishäviöihin vaikuttavat venttiileiden, liitosten ja muiden varusteiden lukumäärä. Taulukossa 2 on esitetty putken karheuksia yleisimmille putkimateriaaleille.

TAULUKKO 2. Karheuksia eri putkityypeille (Rossman 2000)

Materiaali	$[\varepsilon] = \text{mm}$
Valurauta	0,260
Teräs	0,045
Muovi	$< 0,001$

Kokoonpuristumattomien nesteiden putkivirtausten kitkahäviöiden laskentaan on yleisesti käytetty Darcy-Weisbachin ja Hazen-Williamsin kaavoja.

Darcy-Weisbach

Vuonna 1845 julkaistu kaava kitkahäviöstä

$$h_f = f * \frac{l}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (2.3.1)$$

$$[h_f] = \text{mvp}$$

on nimetty kehittäjien Henri Philibert Gaspard Darcyn (1803–1858) ja Julius Weisbachin (1806–1871) mukaan. Kaavassa h_f on painehäviö ja sen yksikkö on metriävesipatsasta (mvp). Kaavassa l on putken pituus, D on putken poikkileikkaus ja v on nopeus. Painehäviön suuruuteen vaikuttaa Darcyn kitkakerroin f , joka on dimensioton.

Virtauksen ollessa laminaarista kitkakerroin voidaan määrittää Jean Louis Poiseuillen (1799–1869) ja Gotthilf Heinrich Ludwig Hagenin (1797–1884) kehittämällä kaavalla

$$f = \frac{64}{Re}, \quad (2.3.2)$$

jossa Re on Reynoldsin luku. Virtauksen ollessa turbulentista voidaan käyttää Swamee-Jainin (julkaistu 1976) kaavaa

$$f = \frac{0,25}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}, \quad (2.3.3)$$

joka on approksimaatio Colebrook-Whiten kaavasta:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right), \quad (2.3.4)$$

jossa ε on putken karheus, D halkaisija ja Re on Reynoldsin luku. Kitkakerroin voidaan selvittää myös Lewis Ferry Moodyn (1880–1953) laatiman käyrästä avulla. Moodyn käyrästä nähdään, kuinka Reynoldsin luku ja suhteellinen karheus vaikuttavat kitkakertoimeen. (Munson 2013.)

Hazen-Williams

Allen Hazenin (1869–1930) ja Gardner Williamsin (1842–1922) mukaan nimetty kaava

$$h_f = \frac{10,67 * l * Q^{1,85}}{C^{1,85} * D^{4,87}} \quad (2.3.5)$$

painehäviön määrittämiseksi on kehitetty ainoastaan vedelle ja on alun perin tarkoitettu pelkästään turbulenttiselle virtaukselle. Kaavassa l on putken pituus, D halkaisija, Q virtaama ja C putken ominaisuuksista, mm. karheudesta, riippuvainen kerroin. Mitä pienempi C arvo on, sitä karheammasta putkesta on kyse. (Rossman 2000.) Taulukossa 3 on esitetty C :n arvoja eri putkimateriaaleille.

TAULUKKO 3. C :n arvoja

eri putkimateriaaleille (Rossman 2000)

Materiaali	C
Valurauta	130–140
Teräs	140–150
Muovi	140–150

Paikallishäviöt

Paikallishäviöt ovat seurausta lisääntyneestä turbulenssista, jota aiheuttavat mm. verkoston venttiilit, pumput, mutkat ja liitokset. Paikallishäviöiden tärkeys riippuu verkoston koosta ja siitä, kuinka tarkka laskennasta halutaan. Paikallishäviöt voidaan laskea seuraavasti:

$$h_L = K_p * \frac{v^2}{2g}, \quad (2.3.6)$$

$$[h_L] = mvp$$

jossa K_p on paikallishäviökerroin, v on virtausnopeus ja g putoamiskiihtyvyys. Paikallishäviökertoimia on selvitetty kokemuseräisesti ja taulukossa 4 on esitetty yleisesti käytettyjä arvoja (Rossman 2000).

TAULUKKO 4. Paikallishäviökertoimia
putkiston tarvikkeille (Rossman 2000)

Tarvike	Paikallishäviökerroin K_p
Palloventtiili	10,0
Kulmaventtiili	5,0
Levyliustiventtiili	0,2
Kulma (45°)	0,4

3 VEDEN ILMASTUSLAITTEISTOT

3.1 Veden ilmastuksen tavoitteet ja yleisimmät ilmastimet

Veden ilmastuslaitteet lukeutuvat ensimmäisiin vedenlaatua parantaviin teknologioihin. Alle on listattu kirjasta *Water Treatment Plant Desing, fourth edition* (vedenkäsittelylaitoksen suunnittelu) yleisimpiä vedenilmastuksen käyttökohteita:

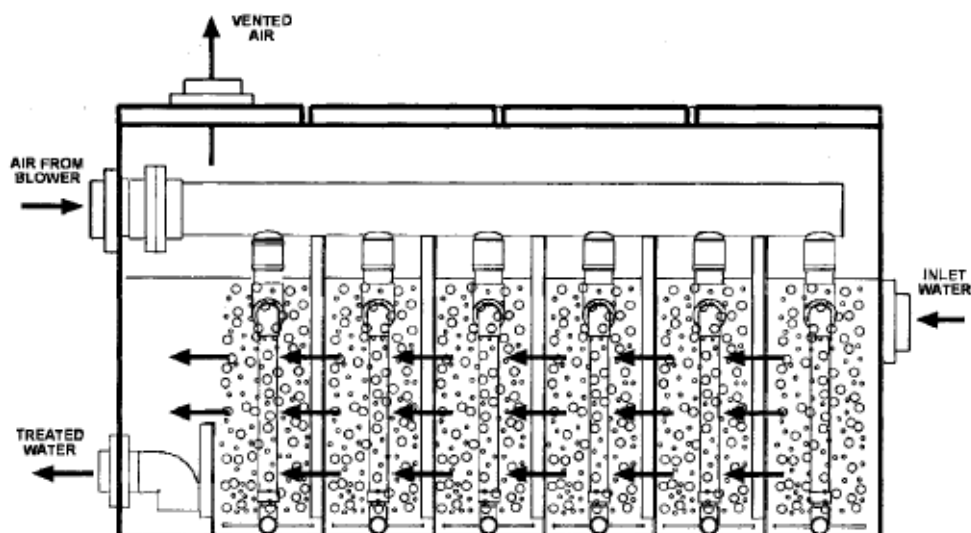
- maku- ja hajuhaittojen vähentäminen sekä orgaanisen aineen hapetus
- hiilidioksidipitoisuuden vähentäminen korroosion estämiseksi
- raudan ja mangaanin poisto
- veden desinfiointi otsoni- ja kloorikaasulla
- kaasujen, kuten radonin, rikkivedyn ja metaanin poisto
- ammoniakin poisto
- myrkyllisten haihtuvien yhdisteiden poisto.

Veden ilmastuslaitteistoja on monentyyppisiä ja edellämainitussa kirjassa ne on jaoteltu diffuusio-, paine-, mekaanisiin- sekä valutuslautailmastimiin.

Diffuusioilmastin

Diffuusioilmastimien toiminta perustuu siihen, että ilmaa syötetään pienten reikien läpi ympärillä olevaan vesimassaan. Reikien koolla voidaan vaikuttaa veden ja ilman väliseen kosketuspinta-alaan. Reikien kokoon vaikuttaa myös ilmastettavan veden likaisuus, koska hyvin pienet reiät tukkeutuvat helposti ja liian isot taas heikentävät ilmastustehokkuutta.

Diffuusioilmastin (KUVA 2) koostuu jakoputkistosta sekä levyistä tai lautasista, joista ilma purkautuu. Ilma syötetään kompressorilla. Jakoputkisto, sekä levyt ja lautaset, voivat olla joko pysty- tai vaakasuunnassa altaan muodosta riippuen. Käytettävä allas voi olla rakennettu aiemmin johonkin muuhun tarkoitukseen ja se voidaan muuttaa ilmastusaltaaksi hyvin helposti ja nopeasti.



KUVA 2. Diffuusio-ilmastin (Baruth 1990, 86)

Paineilmastin

Paineilmastimissa ilma syötetään joko paineelliseen putkistoon tai säiliöön. Molemmissa menetelmissä ilma jakautuu tasaisesti vesimassaan ja menetelmä on erittäin tehokas, mutta energiaa kuluttava. Paineilmastus on erityisen hyvä raudan ja mangaanin poistossa ja sen perään voidaan sijoittaa flo-tatio- tai laskeutusallas.

Mekaaniset ilmastimet

Mekaanisten ilmastimien toiminta perustuu veden tehokkaaseen sekoitukseen, eli se tuo veden pisaroiksi ilmaan tai vie ilman vesimassaan. Vettä sekoitettaessa vesimassa saadaan liikkeeseen ja samanaikaisesti ilma diffuusioitumaan. Menetelmä on käytössä yleisimmin jätevedepuhdistamoilla, joissa vesi on erittäin likaista ja aiheuttaa hajuongelmia.

Valutuslautailmastin

Valutuslautailmastimien tarkoituksena on hajottaa vesi pisaroiksi tai ohueksi kalvoksi, jolloin saadaan kasvatettua veden ja ilman välistä pinta-alaa. Käytännössä vesi pumpataan johonkin tasoon, josta sen annetaan valua painovoimaisesti joko yhtä tai useampaa tasoa kohti lähtötasoa. Menetelmää voidaan hyödyntää muun muassa jätevedenpuhdistuksessa, jossa tasot voivat olla mikrobiliman peittämiä, täten saadaan vähennettyä samalla vedessä olevaa orgaanista ainesta. Menetelmästä hyödytään eniten silloin kun vedensyöttö voidaan hoitaa maaston korkeuserolla, jolloin erillistä pumppausta ei tarvita. (Karttunen 2004, 69.)

3.2 Oxtube- veden ilmastuslaitteisto

Ilmastuslaite, jota työssä tarkasteltiin, koostuu viidestä moduulista ja niiden käyttötarkoitus on selostettu alla. Tarkemmat kuvat ilmastuslaitteesta löytyy liitteestä 1.

Pyörresuppilo- ja ejektori-imuputkimoduuli

Pyörresuppilo- ja ejektori-imuputkimoduulin tarkoituksena on aikaansaada pyörteitä ja imua alipaineen avulla virtauksen ollessa paineetonta. Ejektorin kautta on myös mahdollista syöttää paineistettua ilmaa, jolloin putkistovirtaus voi olla myös paineellista. Pyörteet edesauttavat seikoittumista ja tehostavat alipaineen muodostumista. Moduulin ejektoriosuuden tarkoituksena on siis aloittaa veden ilmastus, jota tehostetaan seuraavissa moduuleissa.

Pyörreläppämoduuli

Pyörreläppämoduuli on kehitetty pyörteiden muodostamiseen, missä pyörteet muodostetaan putkistoon asetettujen levyjen avulla. Tarkoituksena on tehostaa veden ja ilman sekoittumista sekä lisätä ilmakuplien kontaktipinta-alaa pitäen ilmakuplat mahdollisimman pieninä.

Ejektorimoduuli

Ejektorimoduulin, kuten ensimmäisenä esitellyn moduulin ejektoriosuuden, tarkoituksena on alipaineen avulla syöttää ilmaa putkistoon. Moduuli soveltuu myös paineistetun ilman syöttöön.

Impulssimoduuli

Impulssimoduulin tarkoituksena on hajottaa virtaus virtausesteitä käyttäen. Esteet ovat rei'itettyjä tehokkuuden maksimoimiseksi. Impulssimoduuli on toinen tässä työssä tarkemmin tarkasteltavista moduuleista.

Mikroakuplitusmoduuli

Veden ilmastuksessa kuplien koolla on suuri merkitys, mitä pienempiä kuplat ovat, sitä suurempi on muodostuva kokonaispinta-ala, joka vaikuttaa oleellisesti hapensiirron tehokkuuteen. Mikroakuplitusmoduulin tarkoituksena on siis hajoittaa suuret ilmakuplat mahdollisimman pieniksi. Lisäksi moduuli lisää veden ja ilman välistä reagointiaikaa.

4 TUTKIMUKSET VEDEN ILMASTUSLAITTEEN KÄYTÖSTÄ

4.1 Tutkimusten tausta

OxTube- veden ilmastuslaitteistolla on tehty tutkimuksia Oulun yliopistossa sekä Savonia-ammattikorkeakoulussa. Oulussa tehtiin tutkimus, joissa arvioitiin ja optimoitiin laitteiston toimivuutta. Savonia-ammattikorkeakoulussa tutkimukset toteutettiin eri sovelluskohteissa ja tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin laitteisto ilmastaa erityyppisiä vesiä ja mitä ongelmia voi syntyä. Kappaleessa 4.2 on esitetty tutkimuksessa käytetty ilmastuslaitteiston tehokkuuden laskutapa ja luvussa 4.3 on esitelty tiivistetysti Savonia-ammattikorkeakoulussa Sansox Oy:n toimesta kesällä 2014 toteutettu tutkimus ja sen keskeisimmät tulokset.

4.2 Hapensiirron teoria

Hapen liukoisuutta on tutkittu monin eri menetelmin, ottaen huomioon hapensiirtymiseen vaikuttavat tekijät, kuten esimerkiksi lämpötila, kuplien koko ja kontaktiaika. Teorioita hapen siirtymiseen faasien välillä on useita ja yleisin niistä on kaksoisfilmitheoria. Muita teorioita ovat rajakerros-, tunkeutumis-, yhdistetty filmi ja pinnanuuksiutumis- ja pinnanuuksiutumisteoria. Edellämainituista teorioista kaksoisfilmitheoria on yksinkertaisin ja helpoin simuloitava. Siinä kaksi laminaarista kalvoa muodostavat siirtopinnan, jossa kaasujenvaihto tapahtuu. (Mohammed 2013, 24). Kaasun ja nesteen vuorovaikutuksessa on kyse diffuusioliimästä, jossa siirtymisnopeus on verrannollinen pitoisuuden muutokseen pitoisuusyksikköä kohti. Diffuusiassa, eli konsentraatiogradientissa,

$$\frac{ds}{dt} = -D * A * \frac{dC}{dx} \quad (4.1.1)$$

A on pinta-ala, jonka läpi molekyylit siirtyvät, D on diffuusiovakio, s on pinta-alan A läpi siirtyvien molekyylien määrä ja $\frac{dC}{dx}$ on konsentraatiogradientti pituusyksikköä kohden (Karttunen 2003, 203). Diffuusiota tehostaa veden turbulenttinen virtaus, koska tällöin konsentraatio C on sama kaikkialla nesteessä. Kuitenkaan veden ja ilman rajapinnassa konsentraatiogradientti ei ole sama, koska pitoisuudet pyrkivät tasoittumaan, siirtymällä aina vahvemmassa liuoksesta laimeampaan. Edellä esitettyä ilman ja veden välistä kosketuspintaa kutsutaan kaksoisfilmiksi ja sen teoriaa kaksoisfilmitheoriaksi. Kaasumäärän muutos voidaan esittää aikayksikössä,

$$\frac{ds}{dt} = V * \frac{dC}{dt}, \quad (4.1.2)$$

josta saadaan edelleen

$$\frac{dC}{dt} = \frac{D * A}{d * V} * (C_s - C), \quad (4.1.3)$$

jossa V on vesimäärän tilavuus, $\frac{dC}{dt}$ on konsentraation muutos vedessä aikayksikköä kohti, D on diffuusiovakio, d on molekyylärisen siirtymäkerroksen paksuus, A on veden ja ilman kontaktipinnan ala, C on kaasun pitoisuus mittaushetkellä ja C_s on kaasun osittaispainetta vastaava kyllästysarvo

(Karttunen 2003, 204). Edellä mainittujen kaavojen perusteella voidaan todeta, että kaasun siirtymänopeus on suoraan verrannollinen veden ominaispinta-alaan ($\frac{A}{V}$). Veden ominaispinta-ala on se, jolle tulee antaa eniten huomiota, koska siihen voidaan vaikuttaa teknisin sovelluksin. Kuitenkaan täysin kyllästyneeseen tilaan ei ole perusteltua pyrkiä, koska veden happipitoisuuden kasvaessa sen muutosnopeus hidastuu. Veden ja kaasun kontaktipinta ($\frac{D}{d}$) uusiutuu jatkuvasti ja se voidaan kuvata seuraavasti:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{2A}{V} * \sqrt{\frac{k*t_1}{\pi}} * (C_s - C) = \frac{K}{V} * (C_s - C), \quad (4.1.4)$$

jossa k on diffuusiovakio, t_1 on kontaktipinnan uudistumiseen kuluva aika ja K on ilmastuskerroin (Karttunen 2003, 205). Ilmastuskertoimella K kuvataan ilmastuslaitteen ominaisuuksia, kuten turbulenssia ja kontaktipinnan uusiutumisenopeutta. Jos käytetään konsentraatioiden (C_s ja C) yksikköinä $\frac{g}{m^3}$, on ilmastuskertoimen hapensiirtoteho $\frac{g}{h}$ kyllästysvajauksen ollessa $1 \frac{g}{m^3}$. Kokonaisilmastuskerroin saadaan kertomalla K todellisella kyllästysvajauksella. (Karttunen, 2003 s. 205) Muuttuvan pitoisuuden menetelmällä (epälineaarinen regressioanalyysi) saadaan laskettua hapen siirtyminen kemikaaleilla hapettomaksi tehtyyn puhtaaseen veteen. Menetelmä on yleisesti käytössä sen yksinkertaisuuden vuoksi. Kuitenkin sillä saadaan vain hapensiirtoteho täysin hapettomaan veteen, joten todellisuudessa se on pienempi. Sovellettaessa jäte-/teollisuusvesiin tulee ottaa huomioon jäteveden ominaishapenkulutus (R). Jos jäteveden happipitoisuus ei nouse riittävästi voi vesi mennä anoksiiseen tilaan ja täten puhdistusteho laskea merkittävästi (Sassi 2004, 6). Hapen siirtyminen voidaan laskea seuraavalla tavalla:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_x - C) - R. \quad (4.1.5)$$

Integroimalla kaava 2.1.5 saadaan (oletuksena hapenkulutus $R = 0$):

$$C = C_x - (C_x - C_0)e^{-K_L a * t}. \quad (4.1.6)$$

Kaava 2.1.6 saadaan edelleen johdettua muotoon:

$$\frac{C_x - C}{C_x - C_0} = e^{-K_L a * t} \quad (4.1.7)$$

ja edelleen:

$$\ln \frac{C_x - C}{C_x - C_0} = -K_L a * t * \ln e, \quad (4.1.8)$$

joka sievenee

$$-K_L a = \frac{\ln \frac{C_x - C}{C_x - C_0}}{t}, \quad (4.1.9)$$

missä $-K_L a$ on kokonaishapensiirtokerroin ($\frac{1}{\text{aika}}$; K_L = nestefaasin siirtokerroin; $a = \frac{A}{V}$), C_x on kaasun kyllästyspitoisuus vedessä mittauslämpötilassa ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$), C on kaasun pitoisuus vedessä mittaushetkellä ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$), C_0 on kaasun pitoisuus nesteessä alkutilanteessa ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$), t on aika, jonka laite oli käynnissä (sekuntia) (Sassi 2004, 6–7). Laskentaa voidaan käyttää yleisimmillä ilmastimilla ja tuloksista voidaan laskea ominaisilmastustehokkuus (AE) sekä hapensiirron nopeus (OTR). $K_L a$:n määritettyä voidaan laskea laitteen maksimaalinen hapensiirtonopeus OTR (oxygen transfer rate) hapettomaan veteen

$$OTR = K_L a * C_x * V \quad (4.1.10)$$

sekä maksimaalinen ilmastustehokkuus AE (aeration efficiency)

$$AE = \frac{OTR}{P}, \quad (4.1.11)$$

joissa OT on hapensiirtonopeus hapettomaan veteen ($\frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}$), AE on ilmastustehokkuus hapettomaan veteen ($\frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}}$), V on altaan tilavuus (m^3), P on käytetty teho (kW) ja C_x on kaasun kyllästyspitoisuus vedessä mittauslämpötilassa ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$) (Sassi 2004, 8). Tehokkuuden määrittämisessä tulee olla tarkka ja ottaa huomioon siihen vaikuttavat seikat, kuten paineilman tuottamiseen kuluva teho. Lisäksi tulee mainita, onko kyseessä otto- vai akseliteho ja ottaa huomioon, että veden lämpötila vaikuttaa liukoisuuteen ja täten pienentää ilmastustehoa. (Sassi 2004, 8) Kun määritetään AE ja OTR veteen, jossa on happea, tulee laskennassa huomioida vedessä jo oleva happipitoisuus seuraavasti:

$$OTR_c = K_L a * (C_x - C) * V, \quad (4.1.12)$$

$$AE_c = OTR_c / P, \quad (4.1.13)$$

joissa OTR_c on hapensiirtonopeus happipitoiseen veteen ($\frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}$), AE_c on ilmastustehokkuus happipitoiseen veteen ($\frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}}$), V on altaan tilavuus (m^3), P on käytetty teho (kW), C_x on kaasun kyllästyspitoisuus vedessä mittauslämpötilassa ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$) ja C on kaasun pitoisuus vedessä mittaushetkellä ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$) (Sassi 2004, 8). Lisäksi tulee ottaa huomioon mm. lämpötila ja epäpuhtaudet. Lämpötilalla on vaikutuksia esimerkiksi hapen diffuusionopeuteen, veden viskositeettiin ja pintajännitykseen. Täten lämpötila tulee huomioida korjauskertoimilla. Korjauskertoimet voidaan laskea joko aritmeettisesti

$$K_L a_T = K_L a_{20} + \theta_A (T - 20) \quad (4.1.14)$$

tai geometrisesti

$$K_L a_T = K_L a_{20} \theta_G^{(T-20)}. \quad (4.1.15)$$

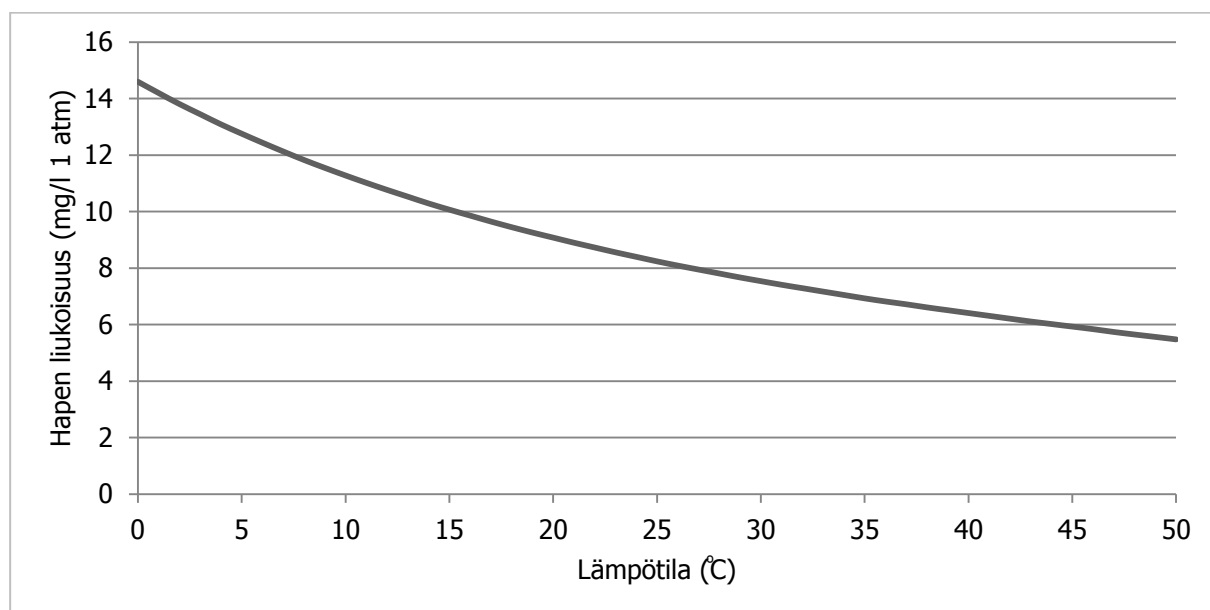
Yhtälöissä 4.1.14 ja 4.1.15 $K_L a_T$ on hapensiirtokerroin lämpötilassa T (1/s) ja $K_L a_{20}$ on hapensiirtokerroin + 20 °C asteessa. Yleisesti käytetään kokemuseräistä geometrista lämpötilakorjauskerrointa 1,024, ellei kokeellisesti ole muuten todettu. (Sassi 2004, 9). Lämpötilakorjauksen lisäksi tulee tehdä siirtokerroin laskelmat α ja β , jotta saadaan huomioon otettua sekoitusaste, veden laatu ja altaan geometria sekä suolapitoisuus ja muut epäpuhtaudet, kuten pinta-aktiiviset aineet. Tyypilliset α -arvot ovat diffuusiostaimitille 0,4–0,8 ja mekaanisille 0,6–1,2. Kun taas β :lle ne ovat 0,7–0,98, kuitenkin yleisesti käytetään arvoa 0,98. (Karttunen 2003, 205) α ja β kertoimet lasketaan seuraavasti:

$$\alpha = \frac{K_L a_{\text{jätevesi}}}{K_L a_{\text{hanavesi}}}, \quad (4.1.16)$$

$$\beta = \frac{C_s \text{ jätevesi}}{C_s \text{ hanavesi}}, \quad (4.1.17)$$

joissa huomioidaan vesijohtovedessä olevat hapensiirtymisen tehokkuutta heikentävät pitoisuudet.

Veden happipitoisuus kertoo kuinka monta milligrammaa happea on liuenut yhtä vesilitraa kohden. Happipitoisuuteen vaikuttaa lämpötilan lisäksi mm. vedenpaine. Lämpötilan vaikutus happipitoisuuteen on esitetty kuviossa 3.



KUVIO 3. Hapen liukoisuus veden lämpötilan suhteen (Muokattu lähteestä (Nicholas 2010, 375))

Happikylläisyys kuvastaa prosenttiosuutena sitä määrää happea, joka on liuenneena veteen. Pohjaveden happikylläisyys riippuu hapettumiskykyisen orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen määrästä. Maaperän mineraaleilla tai kemiallisilla yhdisteillä ei ole merkitystä hapen kylläisyyteen/pitoisuuteen. Kuitenkin hapen kylläisyys vaikuttaa raudan, mangaanin sekä rikin ja typpiyhdisteiden hapetus-pelkistys potentiaaliin ja on täten vaikuttamassa välillisesti muihin vedenlaadun parametreihin. (Lahermo 1999, 49.)

4.3 Savonia-ammattikorkeakoulussa toteutetun tutkimuksen kohteet ja niiden tulokset

Lapinlahden jätevedenpuhdistamo

Lapinlahden Vesi Oy on Lapinlahden kunnan omistama osakeyhtiö, joka vastaa talousveden jakelusta, jäte- ja hulevesien viemäroinnistä sekä jätevesien puhdistuksesta toiminta-alueellaan. Toiminta-alueisiin kuuluvat kaikki taajama-alueet: Lapinlahti, Varpaisjärvi, Alapitkä ja Nerkoo sekä pieni osa haja-asutusalueesta.

Jätevedenpuhdistamoista, Suoniemen puhdistamo sijaitsee Lapinlahdella sekä Varpaisjärven puhdistamo Varpaisjärven taajaman alueella. Suoniemen puhdistamolla puhdistetaan Lapinlahden kirkonkylän, Nerkoon, Alapitkän sekä Lahdenperän viemäriosuuskuntien jätevedet. Alapitkän ja Nerkoon jätevesille on rakennettu siirtoviemäri, jota pitkin ne johdetaan puhdistamolle. Suoniemen puhdistamo on suuri jätevedenpuhdistamo, joka vastaa asukasvastineluvultaan 80 000 asukkaan puhdistamoa ja suuri koko selittyy maidonjalostusteollisuuden (Valion juusto- ja maitojauhetehtäiden) aiheuttamasta jätevesikuormituksesta. Jätevedenpuhdistamoiden ja -pumppaamoiden prosessinhoito ja kunnossapito on ulkoistettu Kemira Operon Oy:lle. Lapinlahden jätevedenpuhdistamo on rakennettu 1976 kaksilinjaiseksi rengaskanavapuhdistamoksi, jota on saneerattu vuosina 1982, 1983, 1993, 1998, 2002 ja 2009. Nykyään rengaskanavat toimivat tasausaltaina rankkasateiden ja muiden häiriöiden aikana. Saneerauksissa on rakennettu uudet syvemmmät ilmastuslinjat ja osa selkeytysaltaista on muutettu jälkisaostusaltaiksi. Lisäksi automatiikkaa ja muuta laitekantaa on uusittu vastaamaan nykypäivän tarpeita. Puhdistamon biologinen ja kemiallinen prosessi on erotettu, jotta niiden optimointi on helpompaa. Puhdistamo on suunniteltu erityisesti typen poistoon.

Lapinlahden puhdistamolla otetaan kuukausittain kaksi kokoomanäytettä (24h), joista määritetään lupaehtojen mukaiset parametrit. Puhdistamon mitoitusvirtaama on $5750 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ ja maksimivirtaama $8400 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$. Tästä virtaamasta noin 25 % on kunnan jätevesiä ja loput Valion juustotehtaan jätevesiä. Toukokuun kookomanäytteen perusteella Valiolta tulevassa jätevedessä on 2,5-kertainen kemiallisen hapenkulutuksen (COD) taso ja 3-kertainen biologisen hapenkulutuksen (BOD) taso verrattuna yhdyskuntajätevedeen kiintoainepitoisuuksien pysyessä lähes samana, joten teollisuudelta tulee suurempi kuormitus niin virtaaman kuin muidenkin pitoisuuksien osalta. Poikkeustilanteita ja prosessin muutoksia ilmenee kuukausittain, mutta suuret tasausaltaat tasaavat kuormituksen asteittaiseksi, jolloin mikrobiologiseen prosessiin ei tule merkittäviä muutoksia.

Tutkimusasetelma

Lapinlahden jätevedenpuhdistamolla selvitettiin ilmastimen ilmastustehokkuus Valion juustotehtaan jätevesilietteelle sekä Lapinlahden yhdyskuntajätevesilietteelle. Lisäksi seurattiin muutoksia pH:ssa, sähkönjohtavuudessa sekä COD- ja ammoniumtyppi ($\text{NH}_4\text{-N}$)-pitoisuuksissa.

Valion juustotehtaan jätevesi johdetaan tehtaalta suoraan jätevedenpuhdistamolle, koska juustotehtaan tehdasalueella on ainoastaan hiekanerotus. Koeajoissa jätevedenpuhdistamolle tuleva jätevesi otettiin käyttöön ennen välppää, joten siinä saattoi olla myös suurempia partikkeleja mukana. Koeajoissa huomattiin, että välppäkanavan pohjalle oli laskeutunut hiekkaa, joka ensimmäisissä testeissä meni ilmastimen läpi ja jäi osittain sen sisälle. Ongelma ratkaistiin laittamalla rei'itetty sankko altaan pohjalle estämään hiekan kulkeutuminen. Jätevedenpuhdistamolle tulevasta yhdyskuntajätevedestä poistettiin hiekka ennen puhdistamolle pumppaamista ja koeajoissa käytettiin välpättyä ta-sausaltaassa olevaa jätevettä. Kaikki hiekka ei ollut kuitenkaan poistunut hiekanerotuksessa, joten sitä ajautui putkistoon pieniä määriä.

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Lapinlahden jätevedenpuhdistamolla saatiin toteutettua vain kaksi kirjattua koeajoa, mutta laitetta testattaessa oli selvästi havaittavissa liuenneen hapen (DO) pitoisuuden kasvua riippuen ilmansyötön määrästä. Koeajojen tulokset on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Lapinlahden jätevedenpuhdistamon koeajojen tulokset
(Valion juustotehtaan- ja yhdyskuntajäteveden tulokset)

	Valion jätevesi		Yhdyskuntajätevesi	
	Ennen	Jälkeen	Ennen	Jälkeen
DO ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$)	7,00	7,80	0,13	0,57
NH ₄ -N ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$)	0,23	0,25	35,50	31,70
COD ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$)	986,00	1136,00	1074,00	1054,00
Lämpötila (°C)	30,00	30,00	6,00	6,00
pH	11,86	11,50	6,52	6,51
Sähkönjohtavuus ($\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$)	5,75	2,14	3,25	3,50
Paine (bar)	0,50	0,40	-	-

Valion juustotehtaan jäteveden pH vaihteli todella paljon ja koeajopäivinä se oli noin 11. Jäteveden ominaisuuksista voitiin todeta myös, että sen liukoisien hapen pitoisuus oli erittäin hyvä jo ennen ilmastimen käsittelyä, joten suuria muutoksia ei voitu edellyttää. Sähkönjohtavuus vaihteli 1,8–5,75 $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$ ja pH 11,06–11,86, eikä merkittäviä muutoksia tapahtunut. COD:n ja NH₄-N:n pitoisuuksissa suurin muutos oli COD-tason kasvaminen 986→1136 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$. COD-tason muutokseen oli voinut vaikuttaa näytteiden kuljetus ja säilytys, mutta pitoisuuden kasvu ei ollut odotettua. Liuenneen hapen pitoisuus kasvoi 7→7,76 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$, joka vastaa + 30 asteessa lähes täysin hapella kyllästynyttä liuosta. Tulosta voidaan pitää hyvänä.

Lapinlahden jätevedenpuhdistamon jätevesilietteen ei ehditty suorittaa kuin yksi koeajo, joten kaikki mittaukset ja tulokset edustavat prosessin sen hetkistä tilannetta. Liuenneen hapen pitoisuus kasvoi yhdyskuntajätevedessä 0,13→ 0,57 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$, jota voidaan pitää kohtalaisena tuloksena.

Lapinlahden jätevedenpuhdistamon yhdyskuntajätevesiliete oli kiintoainepitoista ja noin 6 asteista, eli hyvin tyypillistä jätevesilietettä. Lähes neutraalin (pH 6,5) jäteveden sähkönjohtavuus ja pH mittattiin ennen ilmastimen käsittelyä sekä käsittelyn jälkeen, eikä niissä tapahtunut merkittäviä muutoksia. $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuus laski $35,5 \rightarrow 31,7 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$, joten pitoisuutta saatiin alennettua, mutta ei merkittävästi. COD-taso laski $1074 \rightarrow 1054 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$, joka kertoo siitä, että kemiallisia reaktioita saatiin aikaan, mutta ei merkittävästi.

Lapinlahden koeajoissa oli käytössä myös havaintoputki, jolla nähtiin millaisina kuplina ilma nesteessä kulkee. Näköhavaintojen perusteella ilma nousi hyvin pian putken yläosaan, josse se jatkoi matkaa eteenpäin. Kuplat eivät siis olleet tasaisesti jakautuneet eri puolille putkea, vaan kaikki ilma oli kerääntynyt putken yläosaan.

Ilmastustehokkuus ja maksimaalinen hapensiirtonopeus oli Valion juustotehtaan jätevedellä noin $0,05 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}}$ ja $0,003 \frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}$ yhdyskuntajätevedellä noin $0,12 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}}$ ja $0,007 \frac{\text{kg O}_2}{\text{d}}$. Tulokset eivät ole merkittäviä, mutta ilman pumppua ja ilman paineellista syöttöä tulokset olisivat toki paremmat. Sijoittamalla putkisto olemassa olevaan paineettomaan putkilinjaan saataisiin ilma virtaaman alipaineen avulla putkistoon, jolloin ylimääräistä tehonkulutusta ei tulisi kovinkaan paljoa. Ainoastaan laitteen muodostama painehäviö olisi kuormittava tekijä alkuperäiselle pumpulle.

Savon Sellu

Savon Sellu sijaitsee Kuopion Sorsasalossa ja se valmistaa aalloituskartonkia (fluting-kartonkia) puoliselluloosasta, mitä käytetään vihannes- ja hedelmäpakkauksen valmistamiseen. Tehtaan vuorokausituotanto on 650–900 tonnia ja vuosituotanto vuosina 2000–2006 on ollut 186 000–254 000 tonnia. Savon Sellun jätevedet muodostuvat massa- ja kartonkitehtaan ylijäämästä, kiertovesien ylijuuksutuksesta sekä kaatopaikan ja lietteen varastointikentän valumavesistä. Jäteveden puhdistamon mitoitustavirtaama on $8\,000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ (93 l/s) ja maksimivirtaama $12\,000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ (139 l/s). Virtaushuippuja tasataan tasausaltaalla.

Jätevedenpuhdistamolla jätevesi johdetaan ensin vaakaselkeyttimelle, jossa osa kiintoaineesta laskeutetaan polymeeria apuaineena käyttäen, minkä jälkeen lähes hapeton jätevesi johdetaan esiilmastukseen. Savon sellun esi-ilmastimena on kaksi pintailmastinta, joita vuorotellaan tarpeen mukaan. Esi-ilmastin altaassa on jatkuvatoiminen liukoisen hapen mittausta. Lisäksi jäteveteen lisätään kalkkia ja fosforia mikrobitoiminnan edistämiseksi. Esi-ilmastuksen jälkeen jätevesi johdetaan pääilmastimille, jotka ovat diffuusioon perustuvia pohjailmastimia. Lisäksi ilmastusaltaissa on pintailmastimet, joita käytetään tarpeen mukaan.

Tutkimusasetelma

Savon Sellun jätevedenpuhdistamolla selvitettiin ilmastimen ilmastustehokkuus tehtaan jätevedelle ja lisäksi seurattiin muutoksia pH:ssa, sähkönjohtavuudessa sekä COD- ja $\text{NH}_4\text{-N}$ - pitoisuuksissa.

Savon Sellulla kaikki koeajot tehtiin vaakaselkeyttimen jälkeisestä jätevesivirrasta ja koeajopäivinä olosuhteet pysyivät samoina – sää oli aurinkoinen ja lähes pilvetön, lämpötila + 25–30 °C.

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Savon Sellulla liukoisen hapen pitoisuutta saatiin nostettua keskimäärin 2–4 kertaiseksi lähtöarvoon verrattuna. Pitoisuus nousi eniten virtaaman ollessa 7,5–12,5 l/s ja kaasun syötön ollessa 80 l/min. Sähkönjohtavuus, pH ja lämpötila pysyivät lähes muuttumattomina, mutta COD- ja NH₄-N-tasoissa tapahtui pieniä muutoksia, tarkemmat tiedot on esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Savon Sellun jäteveden lämpötila, sähkönjohtavuus ja pH sekä COD- ja NH₄-N-pitoisuudet ennen ja jälkeen ilmastimen.

Lämpötila (°C)	39,45	
Sähkönjohtavuus ($\frac{mS}{cm}$)	2,76	
pH	5,14	
Virtaama 10–15 l/s		
	Ennen	Jälkeen
COD ($\frac{mg}{l}$)	3770	3830
NH ₄ -N ($\frac{mg}{l}$)	293	278
Virtaama 7,5–12,5 l/s		
	Ennen	Jälkeen
COD ($\frac{mg}{l}$)	3770	3790
NH ₄ -N ($\frac{mg}{l}$)	291	290

Koeajosarjojen ilmastustehokkuudet ja maksimaaliset hapensiirtonopeudet olivat liuenneen hapen pitoisuuden vähäisen nousun ja suuren tehonkulutuksen johdosta matalahkot – keskimäärin 0,1 $\frac{kg\ O_2}{kWh}$ ja 0,003 $\frac{O_2}{d}$.

Savon Sellulla jätevesi otettiin vaakaselkeyttimen jälkeisestä avo-ojasta ja koeajoja toteutettiin eri virtaamilla ja ilmansyötöillä. Liukoisen hapen pitoisuus nousi kummallakin virtaamalla ilmansyöttöä kasvattamalla. Sähkönjohtavuudessa, pH:ssa ja lämpötilassa ei tapahtunut suuria muutoksia ja mitauksien vähäiset muutokset johtuvat todennäköisemmin siitä, että vedenkäsittelyprosessi ilmastimella on niin nopea, että mahdolliset muutokset on vaikea havaita niin lyhyellä aikavälillä tai niitä ei ole. Kemiaallinen hapenkulutus kasvoi kummallakin virtaamalla ja ilmiötä voidaan selittää ainoastaan näytteiden säilytyksessä tapahtuneilla muutoksilla, vaikka kaikki näytteet säilöttiin samalla tavalla. Pitoisuuden oletettiin laskevan. Ammoniumtyypessä reduktiota saavutettiin noin 0,3–5 %, joka vastaa 1–15 $\frac{mg}{l}$. Tulos on hyvä, mutta lähtötasoon verrattaessa vaatimaton.

Kuopion lentoasema

Kuopion lentoasema sijaitsee Siilinjärvellä (Hakkaralan kylän tila; Lentoasema RN:o 10:55) ja asutusta on 1–2 kilometrin säteellä ja lähin taajama on noin 4 kilometrin etäisyydellä lentoasemasta etelään. Lentoasemaa ympäröivät isot järvet Iso-Jälä ja Juurusvesi sekä alueella on lisäksi pieni Kätinlampi. Iso-Jälän pinta-ala on 729 hehtaaria keskisyvyyden ollessa 8,9 metriä ja maksimisyvyyden 48 metriä. Rantaviivaa järvellä on noin 20 kilometriä. Iso-Jälä ja Juurusvesi ovat biologiselta tyypiltään keskiravinteisia kirkkaita järviä, joiden vedenlaatu on hyvä. Juurusveden pinta-ala on 15 900 hehtaaria ja rantaviivaa on 611 noin kilometriä. Veden happipitoisuus on ollut tyydyttävä tai välttävä. Kätinlampi laskee Juurusveteen. Lammen pinta-ala on 8,6 hehtaaria, maksimisyvyys on 21 metriä ja rantaviivaa on 1,3 kilometriä. Kätinlammen happipitoisuus on ollut huono ja lampi on osittain sisäkiertoinen. Kokonaisuudessaan alue on jatkuvaa pitkittäisharjujaksoa, joka rajoittuu alueen järviin. Alueen maaperä on hiekkaa, soraa ja moreenia, ja harjumuodostumassa on suopainanteita. Lentoaseman maanpinta vaihtelee + 90–95 merenpinnan yläpuolella (mpy), ja alueen järvien vedenpinnankorkeus on noin + 81,5 mpy. Pohjavesipintaan lentoaseman tasosta on noin 9–14 metriä. Pohjavesi virtaa pääsääntöisesti Iso-Jälään. Lentoasema ei sijaitse luokitellulla pohjavesialueella.

Kuopion lentoaseman yhteydessä on armeijan varuskunta (Karjalan lennosto), joka on merkittävä kuormittaja siviili liikenteen lisäksi. Lentoasema-alueella on maaliikennealue ja kenttäalue. Maaliikennealue sisältää pysäköinnit ja maaliikennedytydet, ja kenttäalue kiito- ja rullaustiet. Kiitotien pituus on 2,8 kilometriä ja se on 60 metriä leveä. Kenttäalueen pinta-ala on kokonaisuudessaan noin 36,5 hehtaaria.

Finavian kunnossapitoyksikkö vastaa liukkaudentorjunnasta ja talvikunnossapidosta sekä rakennusten-, lentoasema-alueen- ja maakaluston kunnossapidosta sekä pelastus- ja palotoiminnasta. Kunnossapitoyksikkö on matkustajaterminaalirakennuksen yhteydessä. Kalusto ja huoltotoiminta ovat kunnossapitoyksikön tiloissa. Huolto- ja kalustotilojen jätevedet johdetaan viemäriin hiekan ja öljyn erotuksen jälkeen.

Talviaikaan liukkautta torjutaan ensisijaisesti harjaamalla. Tarvittaessa kemikaaleja (kaliumasettaattia tai kaliumformiaattia) levitetään suoraan kiitotielle noin 30–40 metrin leveydelle. Yhdellä levityskerralla kemikaaleja kuluu 1–2 tonnia. Kemikaalit säilötään sisätiloissa erillisessä varastorakennuksessa. Lentokoneiden talviaikainen jäänpoisto on tehtävä turvallisuussyistä lentokoneen päällikön ohjeita noudattaen, ja jäänpoistossa tulee huomioida lentoyhtiön ja konetyypin vaatimukset. Lentokoneiden jäänpoistoon käytetään glykoliliuoksia, joiden kulutusmääriin vaikuttaa eniten lentoliikenteen määrä. Jäänpoisto tehdään omalla seisontapaikalla, ja maahanvaluva glykolineste virtaa painovoimaisesti glykolivesikouruun. Pääsääntöisesti käytetään propyleeniglykolipohjaisia nesteitä ja Kuopion lentoasemalla käsittelyjä tekevät RTG ja Airpro. Glykolia varastoidaan 3 m³ säiliöön, ja lisäksi on varastoglykolia, jota säilytetään 1 m³ IBC konteissa jakelupisteen valumakentällä.

Lentokoneiden jäänestokäsittelyn jälkeen maahan valunut propyleeniglykolineste imuroidaan imuri-autolla ja säilötään 50 m³ muovisäiliöön. Kerätty propyleeniglykolineste toimitetaan jätevedenpuhdistamon mädättämöön, jossa se toimii hiilinlähteenä mikrobitoiminnalle.

Polttoöljyille ja dieselille on omat säiliöt lentoasema-alueella ja kunnossapitoyksiköllä on yksi maanpäällinen jäteöljysäiliö. Kemikaalit ja ongelmajätteet säilytetään kunnossapitohallissa.

Tutkimusasetelma

Savonian Mikrokadun kampuksella toteutettiin koeajoja propyleeniglykolinesteelle ilman syöttöä vaihtelemalla. Propyleeniglykolin virtaama pysyi koeajojen aikana noin 10–15 l/s. Koeajoissa propyleeniglykolinesteen lämpötilassa, sähkönjohtavuudessa sekä pH:ssa ei tapahtunut muutoksia. Keskiarvot mittauksista on koottu taulukkoon 7.

TAULUKKO 7. Lämpötilan, sähkönjohtavuuden ja pH:n mittauksien keskiarvot

Lämpötila (°C)	20,5
Sähkönjohtavuus (mS/cm)	653
pH	7,4

Propyleeniglykolin ilmastaminen poikkesi hieman muista koeajoista siten, että samaa propyleeniglykoliapitoista nestettä kierrätettiin ja sitä oli käytössä vain noin 1,5 m³. Tämän vuoksi käytössä oli vain alussa koskematon propyleeniglykoli, jonka happipitoisuus oli 3,26 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$. Alussa ollut taso siis nousi laitteistoa kokoonpantaessa lähelle kyllästyspitoisuutta ennen varsinaisia testejä. Matalimmillaan taso oli koeajoissa, noin 6 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$.

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Koeajoissa propyleeniglykoli ilmastui yli kyllästymispisteen, mikä aiheutti haasteita useiden peräkkäisten kokeiden suorittamiseksi. Tason laskeminen oli hidasta ja työn etenemisen kannalta testejä jouduttiin ajamaan pienillä tauoilla. Työtä hidasti myös propyleeniglykoliveden vaahtoaminen, jota esiintyi silloin kun propyleeniglykolivettä oli ilmastettu 3–5 minuuttia riippumatta ilmansyötön määrästä. Vaahtoamisen jälkeen vaahdosta jäi vain nestettä. Vaahto ei siis ollut pysyvää. Ilmastustehokkuus ja maksimaalinen hapensiirtonopeus olivat keskimäärin 0,84 $\frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}}$ ja 0,05 $\frac{\text{O}_2}{\text{d}}$.

Propyleeniglykolikoeajoissa saavutettiin hyvä ilmastustehokkuus ensimmäisessä koeajosarjassa (paras tulos oli 4,8 $\frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}}$), vaikka tehonkulutus oli suuri (yhteensä 3235 wattia). Toisessa koeajosarjassa ilmastustehokkuuden laskuun vaikuttivat propyleeniglykolin runsas vaahtoaminen ja jo valmiiksi suuri liuenneen hapen pitoisuus.

Nerkoon pohjavedenotto

Lapinlahdella talousveden tuottamisesta vastaa viiden kunnan yhteinen tukkuvesiyhtiö Ylä- Savon Vesi Oy, jonka kanssa Lapinlahden Vesi Oy tekee yhteistyötä.

Taipale-Nerkoon pohjavedenotto on 1. luokan pohjavesialueella, jonka kokonaispinta-ala on 2,07 km². Pohjavettä muodostuu 0,9 km² alueelta ja antoisuudeksi on arvioitu 500 $\frac{\text{m}^3}{\text{d}}$. Pohjavesialue on Lapinlahden kirkonkylän pohjoispuolella ja se muodostuu noin 4,8 kilometrin pituisesta lajittuneista hiekka-soramaalajeista, alueella on myös savi- ja silttialueita. Pohjavedenpinta on asettunut tasolle +86,5 mpy ja pohjavesi purkautuu antakliinisesti etelästä pohjoiseen. Taipale-Nerkoon pohjavesialueella on Nerkoon vedenotto, joka on pohjavesialueen keskiosassa, josta on noin 80 metriä lähimpään rantaan. Vuonna 2000 Itä-Suomen ympäristölupavirasto on myöntänyt luvan ottaa vettä enintään 1100 $\frac{\text{m}^3}{\text{d}}$. Pohjavedenotto on rakennettu siten, että sen maksimikapasiteetti on n. 1200 $\frac{\text{m}^3}{\text{d}}$, josta kuitenkin otetaan vain n. 300 $\frac{\text{m}^3}{\text{d}}$ suuren rautapitoisuuden vuoksi.

Pohjavedenotannon siiviläputket ovat 13 ja 12,4 metriä syviä, joista syvempi on poistettu kokonaan käytöstä suuren rautapitoisuuden vuoksi. Siiviläosien pituudet ovat 2,5 metriä. Pohjavedenpintaa tarkkaillaan jatkuvasti kymmenestä eri pisteestä. Pohjavedeksi muodostunut vesi pumpataan siiviläputkikaivoista vedenjakolaatikkoon, josta se edelleen johdetaan kalkkikivisuodattukseen, jossa pH tasataan neutraaliksi. Kalkkikivisuodattimeen jää myös muodostunut rauta ja mangaanisakka, jotka poistetaan syöttämällä paineilmalla kalkkikivisuodattimen alaosaan, jolloin sakka saadaan nousemaan kalkkikivisuodattimen läpi ja johdettua poistoon. Sakat poistetaan säännöllisesti ennen suodattimien tukkeutumista. Käsittelyn jälkeen vesi johdetaan alavesisäiliöön ja siitä edelleen UV-säteilytykseen ja käyttöön.

Vedenlaatua seurataan talousvesiasetuksen 461/2000 mukaisesti. Otettu vesimäärä kirjataan vuoro-kausittain ja ottomäärät taulukoidaan ja toimitetaan Pohjois-Savon ELY-keskukselle ja Lapinlahden ympäristönsuojeluviranomaiselle kaksi kertaa vuodessa kuukausikeksiärvoksi muutettuna. Vedenlaatua seurataan ennen ja jälkeen vedenotannon. Näytteenotto-ohjelma sisältää käyttötarkkailussa ja valvontatutkimuksessa tehtävät tutkimukset, joista kemialliset tehdään muita harvemmin. Raakaveden pH on keskimäärin 6,4, vesi on pehmeää ja veden suurimpia ongelmia on sen suuri rauta ja mangaanipitoisuus. Liukoisien aineiden pitoisuus raakavedessä on ollut keskimäärin 3,2 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$ – keskeisimmät tiedot raakavedestä ja pohjavesilaitokselta lähtevästä vedestä on koottu taulukkoon 8.

TAULUKKO 8. Tulevan ja lähtevän veden mittauksia vuosina 2012–2014

PVM	pH		Johtokyky ($\frac{\mu S}{cm}$)		Fe ($\frac{\mu g}{l}$)		Mn ($\frac{\mu g}{l}$)	
	Raaka	Lähtevä	Raaka	Lähtevä	Raaka	Lähtevä	Raaka	Lähtevä
6.3.2012	6,2	7,8	190	330	930	< 30	100	< 10
17.7.2012	6,3	7,6	200	340	590	13	85	7,8
4.3.2013	6,3	7,7	200	340	640	20	110	11
16.7.2013	6,4	7,6	210	370	1900	13	130	12
4.3.2014	6,4	7,5	200	340	1700	11	150	32

Tutkimusasetelma

Nerkoon pohjavedenottamolla liitettiin suoraan tulevan raakaveden linjaan, josta saatiin vettä noin 6 $\frac{l}{s}$. Tällä virtaamalla toteutimme kaikki kokeet ja seurasimme muutoksia liuenneen hapen pitoisuudessa sekä ferroraudan hapettumista ferriraudaksi.

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Pohjavesikokeissa liuenneen hapen pitoisuus ei noussut kuin $0,1-0,25 \frac{mg}{l}$, ja osassa mittauksista taso jopa hieman laski, joka vaikuttaa suoraan ilmastustehokkuuteen (keskimäärin $0,02 \frac{kg O_2}{kWh}$). Maksimaalinen hapensiirtonopeus oli keskimäärin $0,0004 \frac{kg O_2}{d}$. Liukoisen hapen lisäksi seurattiin, miten ferrorauta pystytään hapettamaan ferriraudaksi. Muutosta ei saavutettu pelkällä ilmastuksella. Samalla tehtiin testejä kuinka pH vaikuttaa ferroraudan hapettumiseen. Kokeissa selvisi, että pH:n nosto hapetti ferroraudan ferriraudaksi siitä huolimatta, syötettiinkö ilmaa vai ei.

Pohjavesitestien tavoitteina oli nostaa liuenneen hapen pitoisuutta sekä hapettaa ferrorauta ferriraudaksi. Kumpikaan tavoite ei toteutunut. Syitä siihen miksi liuenneen hapen pitoisuus ei noussut voi olla useita, mutta eniten tuloksiin on todennäköisimmin vaikuttanut pieni virtaama ja lyhyt reagentiaika.

Ferroraudan hapettumisen toteutumiseksi DO:n pitoisuus olisi pitänyt nousta lähelle kylläisyyspitoisuutta. Veden kyllästyspitoisuus + 6 °C on noin $12,4 \frac{mg}{l}$ ja saavutettu taso oli maksimissaan noin $2,8 \frac{mg}{l}$.

Vertailun vuoksi tehtiin testejä myös siten, että pohjaveden pH tasattiin ja nostettiin kunnes rauta alkoi hapettua. Testit osoittivat, että pH hapettaa ferroraudan riippumatta siitä syötetäänkö ilmaa vai ei, eli ferrorauta saatiin hapetettua vasta pH:n nostolla.

5 FYSIKAALISET TULOKSET OXTUBEN TOIMINTAPERIAATTEISTA

5.1 Tulosten laskenta

Seuraavien lukujen tulokset on laskettu käyttäen aiemmin esitettyjä fysiikan lakeja ja tulosten laskennassa käytettyjä lukuja on sievennetty helposti luettavaksi. Tulokset kuvastavat Oxtuben toiminnassa esiintyviä ilmiöitä, ja niitä voidaan hyödyntää tulevaisuuden tarpeissa.

5.2 Pyörimisliike

Pyörimisliikkeen laskennassa tuli ensin selvittää kulma-asema, joka laskettiin kaavan 2.1.10 mukaisesti:

$$\varphi = \frac{s}{r} = \frac{0,628318531 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} = 2\pi$$

ja arvoina käytettiin tarkoituksella sellaisia, että tulos on ympyräkehän täysi pituus. Pyörimisliikkeen keskikulmanopeus saadaan ratkaistua jakamalla kulma-asema sen vaikutusajalla ($\Delta t = 1 \text{ s}$) (kaava 2.1.11):

$$\omega_k = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{1 \text{ s}} = 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

Keskikulmanopeuden muutos alusta saavutettuun nopeuteen on keskikulmakiihtyvyys, joka selvitetiin kaavalla 2.1.12:

$$\alpha_k = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{1 \text{ s}} = 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Lopuksi selvitettiin pyörimisenergia (kaava 2.1.13), joka kertoo pyörimisen saavuttamiseksi käytetyn kokonaisenergian määrän:

$$E_r = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2} * 1 \text{ kg} * (0,1 \text{ m})^2 * \left(2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 = 0,197 \text{ Nm}.$$

Pyörimisenergian määrittämisessä hitausmomenttina käytettiin $0,1 \text{ kgm}^2$, jossa massana oli yksi kilo ja säteenä $0,1 \text{ m}$. Edelläkuvattu laskutoimitus on taulukoitu (TAULUKKO 9) eri vaikutusajoilla, joka vaikuttaa keskikulmanopeuteen, keskikulmakiihtyvyyteen ja pyörimisenergiaan.

TAULUKKO 9. Pyörimisliikkeen muuttujat eri vaikutusajoilla

Kulma-asema	Säde	Aika	Keskikulmanopeus	Keskikulmakihtyvyys	Pyörimisenergia
φ	r (m)	t (s)	ω_k ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$)	α_k ($\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$)	E_r (Nm)
2π	0,1	0,1	62,8	628,32	19,739
2π	0,1	0,5	12,6	25,13	0,790
2π	0,1	2,0	3,1	1,57	0,049
2π	0,1	3,0	2,1	0,70	0,022
2π	0,1	4,0	1,6	0,39	0,012

5.3 Impulssi

Impulssi laskettiin vaiheittain käyttäen putkenpituutena 1 metriä ja vaikutusaikana 1 sekuntia. Ensin laskettiin virtausnopeus (kaava 2.1.7)

$$v = \frac{l}{\Delta t} = \frac{1 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

joka kertoo kuinka nopeasti neste virtaa putkistossa. Kiihtyvyys selvitettiin jakamalla virtausnopeus nopeuden muutokseen menneellä ajalla

$$a = \frac{v-v_0}{t} = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1 \text{ s}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Laskennan kannalta oli myös oleellista tietää tilavuusvirta, joka saatiin jakamalla putken pinta-alan ($0,007854 \text{ m}^2$) ja pituuden tulo valitulla vaikutusajalla jatkuvuusyhtälön mukaisesti (kaava 2.2.1)

$$q_v = \frac{A \cdot l}{\Delta t} = \frac{0,007854 \text{ m}^2 \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 0,007854 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}.$$

Isaac Newtonin 2. lain mukaan voima on massan ja kiihtyvyyden tulo, ja massa saadaan veden tiheyden ja tilavuuden tulosta

$$m = \rho \cdot V = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,007854 \text{ m}^3 = 7,854 \text{ kg}$$

ja lopulta voimaksi saadaan (kaava 2.1.1)

$$F = ma = 7,85 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 7,85 \text{ N}.$$

Lopuksi laskettiin liikemäärän muutos, eli impulssi (kaava 2.1.4) ja tulokseksi saatiin

$$\vec{I} = F \Delta t = 7,85 \text{ N} \cdot 1 \text{ s} = 7,85 \text{ Ns}.$$

Taulukkoon 10 on koottu edelläkuvatun laskutavan mukaisesti tilavuusvirran, kiihtyvyyden, voiman ja impulssin arvoja eri vaikutusajoilla.

TAULUKKO 10. Tilavuusvirta, virtausnopeus, kiihtyvyys, voima ja impulssi eri vaikutusajoilla.

Aika $t(s)$	Tilavuusvirta $q_v (\frac{m^3}{s})$	Virtausnopeus $v (\frac{m}{s})$	Kiihtyvyys $a (\frac{m}{s^2})$	Voima $F (N)$	Impulssi $\vec{I} (Ns)$
0,1	0,0785	10,00	100,00	785,0	79
0,5	0,0157	2,00	4,00	31,0	16
2,0	0,0039	0,50	0,25	2,0	4
3,0	0,0026	0,33	0,11	0,9	3
4,0	0,0020	0,25	0,06	0,5	2

5.4 Hydrodynamiikka

Jatkuvuusyhtälö

Virtausnopeuden muutos putkikoon muuttuessa laskettiin jatkuvuusyhtälöllä kaavan 2.2.3 mukaisesti

$$\frac{v_1 A_1}{A_2} = v_2 = \frac{1 \frac{m}{s} * \pi * 0,05^2}{\pi * 0,075^2} = 0,444 \frac{m}{s}.$$

Putken halkaisija muuttui 0,1 metristä 0,15 metriin. Esimerkkilaskun virtausnopeus oli $1 \frac{m}{s}$, tulos on likimain puolet lähtönopeudesta. Virtausnopeuden muutoksia useammalla alkunopeudella on esitetty taulukossa 11.

TAULUKKO 11. Virtausnopeuden muutoksia eri alkunopeuksilla.

Nopeus alussa $v_1 (\frac{m}{s})$	Nopeus lopussa $v_2 (\frac{m}{s})$
4	1,8
6	2,7
10	4,4

Bernoullin yhtälö

Paineen muutos laskettiin Bernoullin yhtälöllä kaavan 2.2.7 mukaisesti ja virtausnopeudet saatiin jatkuvuusyhtälöstä.

Alla on esitetty esimerkkilasku.

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 - \frac{1}{2} \rho v_2^2 = p_2$$

$$100\,000\text{ Pa} + \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 * \frac{1}{2}\right)_0 - \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(0,444 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 * \frac{1}{2}\right)_1 = 100\,401\text{ Pa}$$

Taulukkoon 12 on koottu paineen muutoksia eri virtausnopeuksilla.

TAULUKKO 12. Paineen muutoksia Bernoullin yhtälöllä laskettuna. Virtausnopeudet on laskettu jatkuvuusyhtälön mukaisesti eri alkunopeuksilla.

Nopeus alussa	Nopeus lopussa	Paineen muutos
$v_1 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	$v_2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	$\Delta p \text{ (Pa)}$
4	1,8	6 420
6	2,7	14 444
10	4,4	40 123

Reynoldsin luku

Reynoldsin lukua voidaan käyttää mm. kitkahäviöiden laskennassa. Alla on esimerkkilasku (laskettu kaavalla 2.2.9) ja taulukko 13, johon on koottu Reynoldsin lukuja eri virtausnopeuksilla.

$$Re = \frac{vD}{\mu} = \frac{0,001 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,1 \text{ m}}{0,000001 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 100$$

TAULUKKO 13. Reynoldsin lukuja eri virtausnopeuksilla.

Virtausnopeus	Reynoldsin luku
$v \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	Re
0,01	1 000
0,1	10 000
1	100 000

5.5 Kitka- ja paikallishäviöt

Veden ilmastuslaitteen kitkahäviöitä tilavuusvirroittain laskettiin Excel-ohjelmistolla käyttäen kaavoja 2.3.1–2.3.6. Painehäviöitä tarkasteltiin myös Epanet-ohjelmistolla, joka on vesijohtoverkoston mallinnusohjelmisto. Tulokset on esitetty taulukossa 14.

TAULUKKO 14. Kitkahäviöt eri tilavuusvirroilla.

Tulokset laskettiin Excel- ja Epanet-ohjelmistoilla.

Tilavuusvirta	Epanet	Darcy-Weisbach	Hazen-Williams
$q_v \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$	$h_f \text{ (mvp)}$	$h_f \text{ (mvp)}$	$h_f \text{ (mvp)}$
0,01	0,03	0,014	0,026
0,02	0,10	0,057	0,092
0,03	0,23	0,196	0,127
0,05	0,61	0,400	0,500
0,10	2,37	1,400	2,000
0,20	9,44	5,700	7,800
0,30	21,89	12,700	17,400

Paikallishäviökerroin laskettiin kaavalla 2.3.6 ja painehäviönä käytettiin kesän kokeiden keskimääräistä painehäviötä (40 000 Pa). K :n arvoksi saatiin:

$$K = \frac{4 \text{ mvp} * 2 * g}{v^2} = \frac{4 \text{ mvp} * 2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = 20.$$

6 TOIMINTAPERIAATTEIDEN POHDINTA JA YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tarkasteltiin Sansox Oy:n kehittämän OxTube- veden ilmastuslaitteen fysikaalisia toimintaperiaatteita. OxTube- veden ilmastuslaitteen toimintaperiaate pohjautuu pyörimis- ja impulssi-ilmiöihin, jotka laskettiin opinnäytetyössä esimerkinomaisesti. Lisäksi laskettiin yleisimmät muuttujat hydrodynamiikan osa-alueelta sekä kitka- ja paikallishäviöt.

Pyörimisliikkeen pyörimisenergiaksi saatiin sekunnin vaikutusajalla 0,197 Nm ja impulssiksi samalla vaikutusajalla 7,85 Ns. Laskennassa käytettiin putken pituutena 1 metriä ja halkaisijana 0,1 metriä.

Pyörimisenergian kautta merkittävin hyöty tulee paineenvaihtelusta pyörteen keskellä. Mitä suurempi pyörimisenergia on sitä suurempi on paineen vaihtelu pyörteen keskiosassa. Pyörimisenergia kasvoi laskennassa 100 kertaiseksi nopeuden 10 kertaistuessa.

Myös impulssin suurin hyöty tulee sen muodostamasta paineesta. Paine puristaa vedessä olevat ilmakuplat pienemmiksi ja kasvattaa ilman ja veden välistä kosketuspinta-alaa, mikä tehostaa ilmastumista merkittävästi. Impulssin suuruus kasvoi samassa suhteessa vaikutusajan kanssa.

Jatkuvuusyhtälön mukaan veden ilmastuslaitteen kohta, jossa halkaisija muuttuu, aiheuttaa virtausnopeuden aleneman noin puoleen lähtötilanteesta. Paineen muutos Bernoullin yhtälön mukaan virtausnopeuden muuttuessa kertaantuu noin 100 kertaiseksi virtausnopeuden 10 kertaistuessa. Laskennassa huomattiin myös, että virtaus muuttuu Reynoldsin luvun mukaan nopeasti turbulenttiseksi putken halkaisijan ollessa suuri. Ilmastuslaitteen käyttövirtaamilla nopeus vaihtelee noin $1\text{--}3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, eli virtaama on turbulenttista koko käyttöalueella.

Kitka- ja paikallishäviöitä tarkasteltiin Darcy-Weisbachin ja Hazen-Williamsin yhtälöillä ja tuloksista huomattiin, että kitkahäviöt ovat merkityksettömässä osassa. Eli kaikki muodostuva painehäviö on peräisin laitteiston pyörimis- ja impulssimoduuleista. Paikallishäviökertoimen arvoksi saatiin 20, joka on suuri, mutta perusteltu.

LÄHTEET

BARUTH, Edward 1990. Water Treatment Plant Desing. San Francisco: McGrawhill Inc.

HAUTALA, Mikko ja PELTONEN, Hannu 2001. Insinöörin (AMK) FYSIIKKA osa 1. 6. Painos. Jyväskylä: Lahden Teho-Opetus Oy.

KARTTUNEN, Erkki. 2003. Vesihuolto I. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

KARTTUNEN, Erkki. 2004. Vesihuolto II. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

LAPPA, Marcello 2012. Rotating thermal flows in natural and industrial processes. Somerset: John Wiley & Sons Inc.

MCCORMACK, Percival 2012. Vortex, Molecular Spin and Nanovorticity: An Introduction. New York: Spriinger Sciences & Business Media.

MOHAMMED, Hayder. 2013. Characterization and Improvement Of a Surface Aerator. Toulouse.

MUNSON, Bruce, 2013. Fundamentals of Fluid Dynamics. 7. Painos. John Wiley & sons Inc.

MÄKELÄ, Mikko. MÄKELÄ, Riitta ja SILTANEN, Olavi. 2003. Insinöörikoulutuksen FYSIIKKA 1. 7. Painos. Tampere: Tammertekniikka.

MÄKELÄ, Mikko 2010. TEKNIIKAN KAAVASTO. Hämeenlinna: Tammertekniikka / AMK-Kustannus Oy.

MÄKYNEN, Asko. 2014. Vuorovaikutuskaavion käytön vaikutus voimakäsitteen oppimiseen lukion mekaniikan opetusjaksoilla. Jyväskylä: Jyväskylän yliopiston kirjasto.

NEWTON, Isaac. 1686. Philosophiae Naturalis Principia Mathematica. London.

NICHOLAS, Pizzi. 2010. Water Treatment 4. Painos. American Water Works Association.

LAHERMO Pertti, TARVAINEN Timo, HATAKKA Tarja, BACKMAN Birgitta, JUNTUNEN Risto, KORTTE-LAINEN Nina, LAKOMAA Tuula, NIKKARINEN Maria, VESTERBACKA Pia, VÄISÄNEN Ulpu ja SUOMELA Pekka. 1999. TUHAT KAIVOA - SUOMEN KAIVOVESIEN FYSIKAALIS-KEMIALLINEN LAATU VUONNA 1999. Espoo: Geolokian tutkimuskeskus.

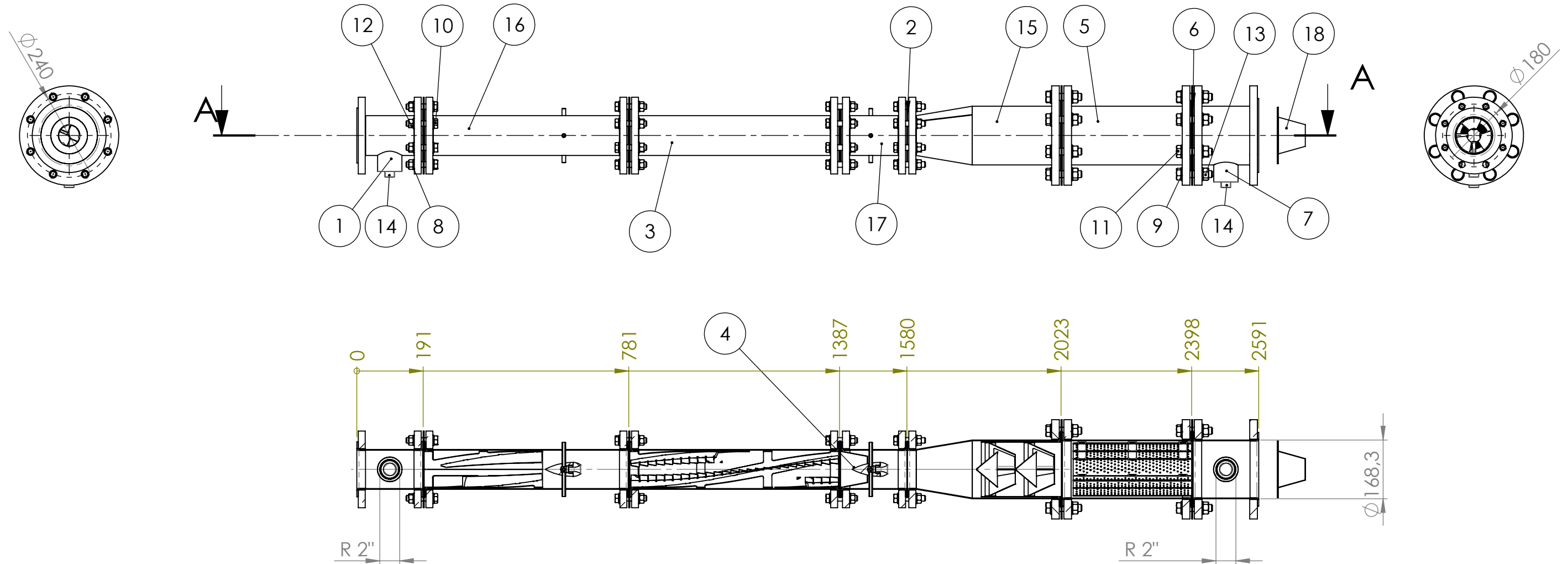
ROSSMAN, Lewis 2000. EPANET 2 Users Manual. Cincinnati.

SASSI, Jukka 2004. Visiox -ilmastimen testit SYKEN:n Suomenojan tutkimusasemalla 28.5.2004. Espoo: VTT.

SINCERO, Arcadio and SINCERO, Gregoria. 2000. PHYSICAL–CHEMICAL TREATMENT OF WATER AND WASTEWATER. Florida: IWA Publishing.



WALKER, Jearl 2014. Fundamentals of physics. 10. Painos. John Wiley & sons Inc.

YOUNG, Hugh. 1991. UNIVERSITY Physics. 8. Painos. Pittsburgh: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.



SECTION A-A

18	Kuristinpatruuna K100-60 lyhyt	118	-	-	-	1
17	Ejektorimoduuli	167				1
16	Pyörresuppilo ja ejektorimuputki moduuli	171				1
15	Impulssimoduuli	163				1
14	4-k tulppa R2	144	EN 10 088-2	1.4301	R2"	2
13	Kuusiomutteri		DIN EN ISO 4032	A2	M20	16
12	Kuusiomutteri		DIN EN ISO 4032		M16	32
11	Kuusioruuvi		DIN EN ISO 4014		M20x90	16
10	Kuusioruuvi		DIN EN ISO 4014		M16x80	32
9	Aluslaatta		DIN EN ISO 7089	A2	A20	32
OSA	DescriptionFinnish	PIIR_NO	STANDARDI	MATERIAALI	Dimensions	Default/KPL

8	Aluslaatta		DIN EN ISO 7089	A2	A16	64		
7	Väliosa DN150	129				1		
6	Tasotiviste DN 150 s=1.5	131			Ø 218 / 169 s=1.5	3		
5	Mikroakuplitusmoduuli	142				1		
4	Kuristinpatruuna K100-74 lyhyt	116	-		-	1		
3	Pyörreläppämoduuli	104				1		
2	Tasotiviste DN 100 s=1.5	102			Ø 162 / 115 s=1.5	5		
1	Väliosa DN100	123				1		
OSA	DescriptionFinnish	PIIR_NO	STANDARDI	MATERIAALI	Dimensions	Default/KPL		
<div></div> <div>TYÖTAPAKOHTAISET TOLERANSSIT: HITSATUT RAKENTEET: SFS 3393 VALUKAPPALEET: SFS 3392, LASTUAVA TYÖSTÖ: SFS 4011 KESKIASTE</div>		Materiaali EN 10025		KPL		PÄIVÄYS	NIMI	MITTAK.
				PIIR.		24.04.2014	Elo	1:12
				KG	72.91	PINNANLAATU	PINTAKÄSITTELY	Sivuja
Tässä oleva informaatio on Happihyrrä Oy:n omaisuutta, eikä sitä saa jäljentää tai luovuttaa kolmannelle osapuolelle ilman Happihyrrä Oy:n kirjallista lupaa								1/1
<div></div> <div>Happihyrrä Oy</div>		NIMITYS - NAME			PROJEKTINO			
		Hapetinputki DN100						
		NIMITYS			TYÖNUMERO			
		KOKOONPANO / OSAKOKOONPANO			PIIR NO		Revisio	
			/			132		